C-3

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

Environment Canada
Environmental Protection Service

collection
ENVIROGUIDE

LE CHLORURE FERRIQUE

Canada

85-1697/

COLLECTION «ENVIROGUIDE»

La collection «Enviroguide» est constituée de guides d'information technique à utiliser en cas de déversements de matières dangereuses. Chaque guide fournit une masse considérable d'information relative au produit chimique dont il traite. L'information ainsi présentée a pour but d'aider l'utilisateur à mettre sur pied un plan d'intervention en cas d'accident et à évaluer les incidences sur l'environnement que peut avoir tel ou tel polluant. Le contenu de chacun des guides a été vérifié par la Direction des services techniques du Service de la protection de l'environnement avant que ne soit autorisée sa publication. Il est à noter qu'une telle autorisation n'implique pas que le contenu des guides reflète les points de vue ou la politique du Service de la protection de l'environnement. De même, le fait de mentionner des marques déposées ou des noms de produits commerciaux ne doit pas être interprété comme une forme de recommandation.

collection
ENVIROGUIDE

LE CHLORURE FERRIQUE

SERVICE DE LA PROTECTION
DE L'ENVIRONNEMENT

DIRECTION GÉNÉRALE DES PROGRAMMES
DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

DIRECTION DES SERVICES TECHNIQUES

OTTAWA
AOÛT 1984
ENVIRONNEMENT CANADA

Publication distribuée par le Service des publications,
Service de la protection de l'environnement,
Environnement Canada,
Ottawa (Ontario)
K1A 1C8
English copy available at the above mentioned address

Édition française de
Ferric Chloride
préparée par le Module d'édition française

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1984
N° de cat. En 48-10/21-1984F
ISBN 0-662-92842-3
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

AVANT-PROPOS

La collection «Enviroguide» a été lancée officiellement en 1983. Elle est constituée de guides d'information technique sur les produits chimiques qui sont les plus souvent en cause dans les cas de déversements accidentels. Les guides, qui s'adressent à des spécialistes dans le domaine des déversements, sont conçus pour aider à planifier les interventions d'urgence et évaluer les incidences sur l'environnement.

Vu la grande quantité d'information présentée et le caractère très technique des guides, ces derniers ne s'adressent pas au personnel de première intervention, pour qui existent déjà des manuels plus appropriés.

L'information offerte a été glanée en majeure partie dans des publications déjà existantes. Les auteurs ont pris grand soin, aussi bien au stade de la compilation qu'à celui de la révision, de vérifier la justesse des éléments retenus. Néanmoins, il ne faut pas voir dans la publication de ces éléments d'information une forme de recommandation de la part du gouvernement du Canada ni de quelque autre groupe.

REMERCIEMENTS

La version définitive du présent guide est l'oeuvre du personnel du Service de la protection de l'environnement, qui a procédé à la refonte de nombreux passages du texte initial, ajouté maints renseignements et commentaires et préparé les schémas et les figures.

Le travail préliminaire avait été donné à contrat par Environnement Canada aux firmes M.M. Dillon Consulting Engineers and Planners, Concord Scientific Corporation et Waterloo Engineering Limited.

L'abondance de détails qu'on trouve dans le guide est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes, organismes et institutions qui ont fourni des données et des conseils précieux, au stade de la compilation comme au stade de la rédaction. Sous ce rapport, l'Association canadienne des fabricants de produits chimiques mérite des remerciements particuliers.

TABLE DES MATIÈRES

	Avant-propos	III
	Remerciements	III
	Liste des figures	VII
	Liste des tableaux	VII
	Abréviations et symboles	VIII et IX
	Définitions	X
	Sigles	XI
1	**Résumé**	1
2	**Propriétés physiques et chimiques**	3
3	**Production, transport et commerce**	10
3.1	Qualités et teneurs	10
3.2	Fabricants situés au Canada	10
3.3	Autres fournisseurs	10
3.4	Itinéraires utilisés pour le transport	10
3.5	Volume de production	10
3.6	Fabrication industrielle	10
3.6.1	Information générale	10
3.6.2	Matières premières	10
3.6.3	Procédé de fabrication	10
3.7	Principales utilisations au Canada	11
3.8	Principaux acheteurs au Canada	11
4	**Manutention du produit et compatibilité**	12
4.1	Citernes et autres récipients d'expédition	12
4.1.1	Information générale	12
4.1.1.1	Wagons-citernes	12
4.1.1.2	Véhicules-citernes routiers	12
4.1.2	Emballages	13
4.2	Déchargement	14
4.2.1	Matériel et procédés de déchargement des wagons-citernes	14
4.2.2	Matériel et procédés de déchargement des véhicules-citernes routiers	15
4.2.3	Matériaux de fabrication et spécifications des organes de déchargement	15
4.3	Compatibilité du chlorure ferrique et des matériaux de fabrication	16
5	**Transport des polluants**	22
5.1	Résumé	22
5.2	Fuite du chlorure ferrique	22
5.2.1	Introduction	22
5.2.2	Nomogrammes de fuites	23
5.2.2.1	Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement	23
5.2.2.2	Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement	23
5.2.3	Exemple de calcul	23
5.3	Diffusion atmosphérique	23
5.4	Comportement dans l'eau	25
5.4.1	Introduction	25
5.4.2	Nomogrammes de diffusion du polluant dans l'eau	25
5.4.2.1	Diffusion dans les rivières non soumises aux marées	26
5.4.2.2	Diffusion dans les étendues d'eau calme ou les lacs (au repos)	33
5.4.3	Exemples de calcul	33
5.4.3.1	Teneur en polluant dans une rivière non soumise aux marées	33
5.4.3.2	Teneur en polluant dans les étendues d'eau calme ou les lacs (au repos)	33
5.5	Comportement dans le sous-sol: pénétration dans le sol	38
5.5.1	Mécanismes	38

5.5.2	Migration du chlorure ferrique dans la zone non saturée	38
5.5.3	Coefficient de perméabilité du nitrate d'ammonium en sol saturé	38
5.5.4	Types de sol	40
5.5.5	Nomogrammes de migration	40
5.5.6	Exemple de calcul	40
6	**Protection de l'environnement**	45
6.1	Limites maximales permises	45
6.1.1	Qualité de l'eau	45
6.1.1.1	Situation au Canada	45
6.1.1.2	Situation ailleurs dans le monde	45
6.1.2	Qualité de l'air	45
6.2	Toxicité pour les espèces aquatiques	45
6.2.1	Évaluation de la toxicité aux États-Unis	45
6.2.2	Mesures de la toxicité	45
6.2.3	Études en milieu statique	48
6.3	Toxicité pour d'autres organismes	48
6.3.1	Toxicité pour le bétail	48
6.3.2	Toxicité pour les végétaux	48
6.3.3	Toxicité pour les insectes	49
6.4	Dégradation du polluant	49
6.5	Devenir et effets à long terme	49
7	**Protection de la santé**	50
7.1	Normes d'exposition recommandées	50
7.2	Données sur les propriétés irritantes	50
7.2.1	Contact avec la peau	50
7.2.2	Contact avec les yeux	51
7.3	Seuil de perception des caractères organoleptiques	51
7.3.1	Odeur	51
7.3.2	Goût	51
7.4	Études à long terme	51
7.4.1	Inhalation	51
7.4.2	Ingestion	52
7.4.3	Injection intrapéritonéale	53
7.4.4	Injection intraveineuse	53
7.4.5	Injection subcutanée	53
7.4.6	Carcinogénécité, tératogénécité et mutagénécité	53
7.5	Symptômes d'intoxication	54
7.5.1	Inhalation	54
7.5.2	Ingestion	54
7.5.3	Contact avec la peau	54
7.5.4	Contact avec les yeux	55
7.6	Toxicité des produits de décomposition ou de combustion pour l'homme	55
7.6.1	Chlorure d'hydrogène, chlorure ferreux et chlore	55
8	**Compatibilité chimique**	56
8.1	Compatibilité du chlorure ferrique et de divers corps chimiques	56
9	**Mesures d'intervention et de sécurité**	57
9.1	Mesures recommandées	57
9.1.1	Risques d'incendie	57
9.1.2	Moyens d'extinction	57
9.1.3	Mesures d'intervention en cas de déversement	57
9.1.3.1	Information générale	57
9.1.3.2	Déversements sur le sol	57
9.1.3.3	Déversements dans l'eau	57
9.1.4	Nettoyage et traitement	58
9.1.4.1	Information générale	58

9.1.5	Elimination du polluant	58
9.1.6	Appareils et vetements de protection	58
9.1.7	Précautions spéciales	58
9.2	Equipement et produits spécialisés d'intervention	59
10	**Cas de déversement accidentel**	60
10.1	Bris d'un réservoir	60
11	**Identification et dosage des polluants**	61
11.1	Dosage du polluant présent dans l'air (analyse quantitative)	61
11.1.1	Absorption atomique	61
11.2	Identification du polluant présent dans l'air (analyse qualitative)	62
11.3	Dosage du polluant présent dans l'eau (analyse quantitative)	62
11.3.1	Absorption atomique	62
11.4	Identification du polluant dans l'eau (analyse qualitative)	62
11.5	Dosage du polluant présent dans le sol	63
11.5.1	Spectrophotométrie	63
11.6	Identification du polluant dans le sol (analyse qualitative)	63
12	**Références et bibliographie**	64
12.1	Références	64
12.2	Bibliographie	70

LISTE DES FIGURES

1 Diagramme de phase de $FeCl_3 \cdot H_2O$ 7
2 Masse volumique des solutions en fonction des températures 8
3 Tension de vapeur en fonction de la température 8
4 Diagramme de phase 9
5 Fûts typiques 14
6 Perforation de la paroi inférieure d'un wagon-citerne 23
7 Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement 24
8 Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement 24
9 Distance en fonction du temps 27
10 Rayon hydraulique en fonction de la largeur du canal 28
11 Coefficient de diffusion turbulente en fonction du rayon hydraulique 29
12 Alpha en fonction du coefficient de diffusion turbulente 30
13 Delta en fonction de alpha 31
14 Teneur maximale en fonction de delta 32
15 Volume d'eau en fonction du rayon hydraulique 34
16 Teneur moyenne en fonction du volume d'eau 35
17 Étapes à suivre pour calculer la teneur en polluant dans une rivière non soumise
18 Migration dans le sol 39
19 Plan d'utilisation des nomogrammes 41
20 Migration dans du sable grossier 42
21 Migration dans du sable limoneux 43
22 Migration dans du till argileux 44

LISTE DES TABLEAUX

1 Nomogrammes de conversion 6
2 Spécifications des wagons-citernes 12
3 Spécifications des véhicules-citernes routiers 13
4 Fûts employés pour le transport du chlorure ferrique 13
5 Compatibilité du chlorure ferrique et de certains matériaux de fabrication 17

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

adf	Antidéflagrant
atm	Atmosphère
c.f.	Coupelle fermée
c.o.	Coupelle ouverte
CPG	Chromatographie en phase gazeuse
d	Densité
d vap	Densité de vapeur
d.-v.	Demi-vie
D ext.	Diamètre extérieur
D int.	Diamètre intérieur
DAMM	Diamètre aérodynamique moyen en masse
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
D_e	Diamètre d'entrée
DIF	Détecteur d'ionisation à flamme
DMM	Diamètre moyen en masse
DMN	Diamètre moyen en nombre
DMV	Diamètre moyen en volume
DPI	Détecteur à photo-ionisation
D_s	Diamètre de sortie
DL min.	Dose létale minimale
DL 50	Dose létale moyenne
et coll.	et collaborateurs
eV	Électronvolt
f. n. éq.	Fumée normalisée équivalente
gal imp.	Gallon impérial
IDLH	*Immediately Dangerous to Life or Health*
IR	Infrarouge
j	jour
J	Joule
k	Coefficient de perméabilité
l	litre
L.I.E.	Limite inférieure d'explosibilité
L.I.I.	Limite inférieure d'inflammabilité
L.S.E.	Limite supérieure d'explosibilité
L.S.I.	Limite supérieure d'inflammabilité
m	Masse
MAK	Teneur maximale admissible (norme établie par la RFA)
MAK-K	Teneur maximale admissible (norme établie par la RDA)
MAK-D	Teneur maximale admissible – courte durée (norme établie par la RDA)
max.	Maximum
mé/l	Milliéquivalent par litre
MIK	Teneur maximale d'immission (norme établie par la RDA)
min.	Minimum
mn	Minute
M mol.	Masse molaire
M vol.	Masse volumique
mol	Mole
MPT	Moyenne pondérée en fonction du temps
N	Newton
Pa · s	Pascal seconde
pds éq.	Poids équivalent
ppb	Parties par milliard (10^{-9})
ppm	Parties par million (10^{-6})
ppt	Parties par mille (10^{-3})
psi	*Pounds per square inch*
P	Pression
P_c	Pression critique
PEL	*Permissible Exposure Limit*
Po	Poise
Pt cong.	Point de congélation
Pt déf.	Point de déflagration
Pt dét.	Point de détonation
Pt ébul.	Point d'ébullition
Pt écl.	Point d'éclair
Pt écoul.	Point d'écoulement
Pt fus.	Point de fusion
Pt liq.	Point de liquéfaction
PVC	Chlorure de polyvinyle
q	Débit
q_e	Débit d'entrée
q_f	Débit de fuite
q_m	Débit-masse
q_s	Débit de sortie
q_v	Débit-volume
std	Standard
SM	Spectroscopie de masse
St	Stokes
STEL	*Short Term Exposure Limit*
t	Tonne
t	Temps
temp.	Température
$temp._c$	Température critique
TE 50	Teneur efficace moyenne
tf	Tonne forte
TI 50	Teneur inhibitrice moyenne
TLm	Tolérance moyenne
TL min.	Teneur létale minimale
TL 50	Teneur létale moyenne
TLV®	*Threshold Limit Value*
TLV®C	*Threshold Limit Value-Ceiling*
TPN	Température et pression normales

TT min.	Teneur toxique minimale
u	Vitesse du vent
μ	Viscosité
vap	Vapeur
vol.	Volume
V	Vitesse d'écoulement
V biod.	Vitesse de biodégradation
V évap.	Vitesse d'évaporation
^{o}Bé	Degré Baumé
^{o}C	Degré Celsius
ϕ	Diamètre
x	Distance sous le vent
~~W~~	Ne pas utiliser d'eau comme moyen d'extinction

DÉFINITIONS

Les définitions figurant ci-dessous valent pour la collection «Enviroguide». Le lecteur notera qu'elles n'ont pas toujours une portée générale. Pour plus de détails, ou pour d'autres définitions, se reporter au manuel d'introduction de la collection.

Bio-accumulation. – Rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).

Bio-amplification. – Rétention d'une substance dans les tissus à des teneurs de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie des organismes de la chaîne alimentaire.

Bioconcentration. – Rétention d'une substance dans les tissus d'un organisme au point que la teneur des tissus en cette substance surpasse la teneur du milieu ambiant en cette substance, à un moment donné de la vie de cet organisme.

Concentration. – Comme ce mot a des sens multiples et parfois mal définis selon qu'il s'agit de chimie, de biologie ou d'écologie, on lui a préféré des termes jugés plus précis, tels titre, teneur et bioconcentration.

Contaminant. – Polluant qui figure sur une liste de produits dangereux, établie en vertu de la Loi sur les contaminants de l'environnement.

Dose létale minimale. – Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la dose définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible dose (autre que la DL 50) d'une substance dont l'absorption, excluant l'inhalation, en une ou plusieurs prises, au bout d'un temps donné, a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. DL min.

Dose létale moyenne (1). – Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la dose qui tue, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. DL 50.

Dose létale moyenne (2). – À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la dose (calculée) d'une substance censée entraîner, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'absorption, excluant l'inhalation, d'une quantité de cette substance par un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. DL 50.

Dose toxique minimale. – La plus faible dose d'une substance, introduite par toute autre voie que l'inhalation, pendant quelque période de temps que ce soit, dont l'absorption a été signalée comme cause d'effet toxique chez des personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. DT min.

Facteur de bioconcentration. – Rapport de la teneur en une substance des tissus d'un organisme exposé (moins la teneur des tissus d'un organisme témoin) à la teneur en cette substance du milieu ambiant.

IDLH *(Immediately Dangerous to Life or Health).* – Teneur plafond à laquelle, dans un délai maximal d'exposition de 30 minutes, il est possible à une personne de fuir les lieux exposés sans qu'il n'y ait manifestation de signes fonctionnels d'intoxication, perturbation irréversible de la santé ou décès. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Immission. – Transfert d'un polluant de l'atmosphère vers un «récepteur» qui peut être une personne, un animal, une plante. La teneur maximale d'immission, mentionnée au chapitre 7, se rapporte au polluant retenu dans les poumons. Il s'agit d'un concept d'origine allemande, adopté par l'ISO.

Létal. – En toxicologie, synonyme de mortel.

MAK *(Maximale Arbeidsplatz Konzentration).* – Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RFA.

MAK-D. – Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

MAK-K. – Teneur limite admissible en milieu de travail pour une période très courte ne dépassant pas 30 minutes. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

PEL *(Permissible Exposure Limit).* – Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle peuvent être exposés des travailleurs pendant une période de relève. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Polluant. – Agent physique, chimique ou biologique qui provoque une dégradation dans un milieu donné.

STEL (TLV – *Short Term Exposure Limit*). – Teneur limite à laquelle les travailleurs peuvent être exposés de façon continue pour une courte période sans souffrir d'irritation, de dommage irréversible aux tissus ou d'une narcose suffisamment grave pour accroître la probabilité de blessure par accident, diminuer la capacité de fuir ou réduire physiquement l'efficacité au travail, en prenant pour acquis que la TLV quotidienne n'a pas été dépassée. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

Teneur. – Quantité de matière solide, liquide ou gazeuse, rapportée à une masse ou à un volume d'autres matières dans lesquelles elle est en mélange, suspension ou dissolution.

Teneur efficace moyenne. – Dans le cas de la toxicité pour la micro-faune, il s'agit de la teneur à laquelle se produit, chez 50 p. 100 de la population, pour une durée d'exposition donnée, un effet tel que l'immobilisation, la perte de l'équilibre, une déficience de croissance ou même la mort. Abrév. TE 50.

Teneur inhibitrice moyenne. – Dans le cas de la toxicité pour la micro-flore ou la micro-faune, il s'agit de la toxicité qui inhibe à 50 p. 100 une activité biologique (par exemple, la croissance) en un temps déterminé. Abrév. TI 50.

Teneur létale minimale. – Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la teneur définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible teneur (autre que la TL 50) de l'air en une substance dont l'inhalation a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. TL min.

Teneur létale moyenne (1). – Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la teneur à laquelle meurent, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. TL 50.

Teneur létale moyenne (2). – À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la teneur (calculée) de l'air en une substance dont l'inhalation est censée provoquer, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'exposition d'un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. TL 50.

Teneur plafond. – Teneur maximale admissible établie pour une durée d'exposition bien déterminée, dans le cas d'une substance très toxique. (L'IDLH et la TLV®-C sont des teneurs plafonds.)

Teneur toxique minimale. – La plus faible teneur de l'air en une substance à laquelle des personnes ou des animaux ont été exposés, pour quelque période de temps que ce soit, sans qu'il y ait eu d'effet toxique chez les personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. TT min.

Titre (d'une solution, en chimie). – Rapport de la masse d'une substance dissoute à la masse totale ou du nombre de moles d'un constituant au nombre total de moles.

TLV® *(Threshold Limit Value).* – Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle la majorité des travailleurs peuvent être exposés régulièrement à raison de 8 heures par jour, 5 jours par semaine, sans subir d'effet nocif. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

TLV®-C *(Threshold Limit Value-Ceiling).* – Teneur limite admissible pour un moment donné. Il s'agit d'une valeur plafond définie et déterminée par l'ACGIH.

Tolérance moyenne. – Niveau de tolérance correspondant à la teneur à laquelle 50 p. 100 des sujets d'un test survivent au bout d'un temps donné. Abrév. TLm.

SIGLES

ACGIH	American Conference of Government Industrial Hygienists
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWQC	Ambient Water Quality Criteria (USA)
AWWA	American Water Works Association
CBG	Chemical Buyers' Guide (USA)
CCD	Condensed Chemical Dictionary (USA)
CCPA	Canadian Chemical Producers Association
CCT	Commission canadienne des transports
CHRIS	Chemical Hazards Response Information System (USA)
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
ITII	International Technical Information Institute (Japon)
MCA	Manufacturing Chemists Association (USA)
MDT	Ministère des Transports (du Canada)
NACE	National Association of Corrosion Engineers (USA)
NAS	National Academy of Sciences (USA)
NFPA	National Fire Protection Association (USA)
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
NRC	National Research Council (USA)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (USA)

1 RÉSUMÉ

1.1 Chlorure ferrique ($FeCl_3$)

Le chlorure est un composé du fer III qui en solution a une couleur jaune-brun à brun-rougeâtre, à l'état solide, une couleur brun à noir et qui dégage une odeur légèrement acide.

Synonymes
Perchlorure de fer, sesquichlorure de fer, trichlorure de fer.

Numéros d'identification
UN 1773 (à l'état solide); UN 2582 (en solution); CAS 7705-08-0; OHM-TADS 7217242; STCC 4944138 (à l'état solide); STCC 4932343 (en solution).

Qualités et teneurs

À l'état solide	Anhydre: 96 p. 100 à 99 p. 100 Hexahydrate: 60 p. 100
En solution	29 p. 100 à 46 p. 100

Dangers immédiats
Incendie. – Le chlorure ferrique n'est pas combustible.
Effet sur l'homme. – Le contact du chlorure ferrique irrite la peau. C'est un produit corrosif.
Effet sur l'environnement. – Le chlorure ferrique est nocif pour certaines espèces du milieu aquatique, à des teneurs aussi faibles que 5 mg/l.

Données relatives aux propriétés physiques

État (15 °C; 1 atm)	Solide
Point d'ébullition	Se décompose à 315 °C - 319 °C
Point de fusion	306 °C
Inflammabilité	Non combustible
Densité relative (eau = 1)	2,9 à 25°/4 °C (anhydre) 1,4 à 42 °Bé (en solution)
Solubilité (dans l'eau)	74,4 g/100 ml à 0 °C
Comportement (dans l'eau)	Descend au fond et se mélange; à l'état solide, il réagit de façon exothermique et dégage des vapeurs de chlorure d'hydrogène (HCl)

Dangers pour l'environnement
Le chlorure ferrique peut persister indéfiniment dans l'environnement, habituellement sous forme insoluble. Il ne se biodégrade pas, et il est possible qu'en milieu aquatique, il y ait bio-concentration et bio-accumulation de fer chez la flore aquatique d'eau douce et d'eau salée, les invertébrés et les poissons.

Dangers pour l'homme
Teneur maximale admissible établie par l'ACGIH (TLV®): 1 mg/m^3. Teneur immédiatement dangereuse pour la vie ou la santé (IDLH): non établie.
Effets en cas d'inhalation. – Les vapeurs et les brouillards peuvent irriter les voies respiratoires supérieures. Les poussières sont irritantes.

Effets en cas de contact. – Le contact prolongé du chlorure ferrique en solution tache la peau, peut provoquer une dermatite semblable à celle causée par les acides faibles et irrite les yeux.

Dispositions immédiates à prendre

• En cas de déversement

Interdire l'accès aux lieux où s'est produit l'accident. Signaler «Produit corrrosif». Avertir le fabricant et les autorités compétentes. Arrêter l'écoulement et confiner le liquide déversé si cela ne présente aucun danger. Éviter tout contact avec le chlorure ferrique, qu'il soit en solution ou à l'état solide. Empêcher l'eau polluée d'atteindre un égout ou un cours d'eau.

• En cas d'incendie

Le chlorure ferrique n'est pas combustible. Employer un jet d'eau pulvérisé ou vaporisé, de la mousse, de la poudre chimique sèche ou du CO_2.

Mesures d'intervention d'urgence

• Chlorure ferrique répandu sur le sol

Ramasser le produit manuellement ou mécaniquement. Absorber de petites quantités de chlorure ferrique liquide avec du sable ou d'autres matériaux absorbants. Enlever le chlorure ferrique à l'état solide à la pelle et le mettre dans des contenants munis d'un couvercle.

• Chlorure ferrique déversé dans l'eau

Confiner l'eau polluée au moyen de barrages ou d'un dispositif de dérivation. Précipiter par un traitement au bicarbonate de sodium. Filtrer l'eau ou effectuer une décantation. Enlever les sédiments contaminés et le précipité à l'aide d'un appareil aspirateur ou de dragues mécaniques.

2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Propriétés physiques	
Aspect	Solide brun noir (CRC, 1980) ou solution aqueuse orange-brun* (CHRIS, 1978)
État à l'expédition	Liquide (solution aqueuse) ou solide (anhydre ou hexahydraté)
État physique (15 °C; 1 atm)	Solide
Point de fusion	306 °C (anhydre) (CRC, 1980)
Point d'ébullition	Se décompose à 315 °C - 319 °C (Hawley, 1977; Merck, 1983; CRC, 1982)
Température de décomposition	315 °C - 319 °C
Densité relative	À l'état solide: 2,898 entre 4 °C et 25 °C (CRC, 1980) En solution: 1,408 à 15,5 °C et 42 °Bé (solution à 39 p. 100) (CRC, 1982)
Propriétés relatives à la combustion	
Inflammabilité	Non combustible (CHRIS, 1978)
Chaleur de décomposition	43,76 kJ/mol (332 °C) (JANAF, 1971)
Produits de décomposition	Chlorure ferreux et chlore (Merck, 1976; Bailar, 1973; Kirk-Othmer, 1981)
Autres propriétés	
Masse moléculaire de la substance pure	162,21 (CRC, 1982)
Composition caractéristique de la qualité commerciale	À l'état solide: Anhydre, 96 p. 100 à 99 p. 100 de $FeCl_3$; hexahydraté, 60 p. 100 de $FeCl_3$ et 40 p. 100 de H_2O (Ullmann, 1975) En solution: 29 p. 100 à 46 p. 100 de $FeCl_3$
Viscosité	9,655 mPa · s (solution aqueuse à 40 p. 100 à 20 °C) (CRC, 1980)
Hygroscopicité	Très élevée (Merck, 1976)
Chaleur latente de fusion	43,1 kJ/mol au point de fusion (JANAF, 1971)
Chaleur de formation	- 362,81 kJ/mol à 25 °C (JANAF, 1971)
Chaleur de dissolution	132,7 kJ/mol à 18 °C (Perry, 1973)
Capacité thermique molaire à pression constante	134 J/mol · °C à 25 °C (JANAF, 1971) 96 J/mol · °C à 25 °C (CRC, 1982)
pH de la solution aqueuse	Une solution d'hexahydrate à 5 p. 100 a un pH de 1,7 (Kirk-Othmer, 1981)
Solubilité	
• dans l'eau	Anhydre: 74,4 g/100 ml à 0 °C (CRC, 1982); 535,7 g/100 ml à 100 °C (CRC, 1982) Hexahydraté: 91,9 g/100 ml à 20 °C (CRC, 1982)

* Les solutions contenant l'ion ferrique se distinguent par leur coloration jaune-brun causée par la présence de $FeOH^{++}$. L'ion ferrique (Fe^{3+}) est incolore ou pourpre pâle; il s'hydrolyse en solution aqueuse: $Fe^{3+} + H_2O \rightleftharpoons FeOH^{2+} + H^+$. Une solution de couleur rouge-brun indique la présence de $Fe(OH)_3$ ou plus exactement de $Fe_2O_3 \cdot x\,H_2O$. L'addition d'acide nitrique à une solution ferrique décolore la solution, alors que l'addition d'acide chlorhydrique la jaunira ($FeCl^{2+}$ est jaune) (Cotton, 1972; Sienko, 1961; Hoguess, 1954). Par conséquent la couleur d'une solution dépendra des facteurs que l'on vient de discuter.

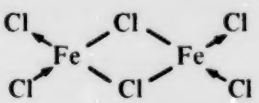
• dans d'autres produits courants	Anhydre: dans l'acétone, 63 g/100 ml à 18 °C (CRC, 1982) Soluble dans l'éthanol, le méthanol, l'éther diéthylique (CRC, 1982), nitriles et amines (Bailar, 1973), glycérol (Hawley, 1971) et cétones (Ullmann, 1975) Hexahydraté: soluble dans l'éthanol et l'éther diéthylique (CRC, 1982)

Propriétés chimiques

Le chlorure ferrique se présente sous la forme de cristaux hygroscopiques hexagonaux de couleur brun-noir. On l'obtient par synthèse à partir du fer et du chlore gazeux à 350 °C, à partir de l'oxyde ferrique (Fe_2O_3) et du chlorure d'hydrogène jusqu'à 1000 °C ou par d'autres méthodes comme le chauffage d'oxyde ferrique sous pression en présence de tétrachlorure de carbone (CCl_4). La stabilité thermique des halogénures ferriques décroît du fluorure à l'iodure. Le fluorure ferrique (FeF_3) sublime à plus de 1000 °C, alors que le chlorure ferrique sublime à plus de 300 °C et qu'il se décompose de façon perceptible en chlorure ferreux ($FeCl_2$) et en chlore selon la réaction suivante:

$$2\ FeCl_3 \rightleftharpoons 2\ FeCl_2 + Cl_2$$

Il faut un excès de chlore lors de la purification (sublimation) pour minimiser le taux de décomposition. À l'état gazeux, le chlorure ferrique existe sous la forme de dimère à 400 °C et sous la forme de monomère à 750 °C. À l'état solide, les

Fe_2Cl_6 

cristaux sont caractérisés par une structure de couche semi-covalente avec un arrangement hexagonal d'ions chlorure: chaque atome de fer est entouré octaédriquement par six atomes de chlore.

Le chlorure ferrique est l'halogénure ferrique le plus commun, suivi de la forme hexahydratée $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$, qui est une masse jaune deliquescente. L'ion ferrique est un agent d'oxydation relativement fort, et le chlorure ferrique est employé à la fois comme oxydant et agent de chloruration dans la fabrication d'encres, de pigments et teintures. On l'utilise également dans le traitement des déchets et dans celui des gaz de récupération industriels (Bailar, 1973; Cotton, 1972; Kirk-Othmer, 1981).

Le chlorure ferrique est soluble dans l'eau, le méthanol, l'éthanol, l'acétone et, en général, dans les éthers, les cétones, les nitriles et les amines. Il est relativement insoluble dans les solvants non polaires comme le benzène et insoluble dans l'acétate d'éthyle. Le chlorure ferrique forme des complexes dans des solvants donneurs. Le chlorure ferrique dissous dans l'eau forme plusieurs hydrates dont $FeCl_3 \cdot n\ H_2O$ où n = 10, 6, 3,5, 2,5 et 2. Le chlorure ferrique anhydre subit une hydratation au contact de l'humidité dans l'air et forme du chlorure ferrique hexahydraté jaune-brun $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$ (sa structure réelle étant $[FeCl_2\ (H_2O)_4]\ Cl \cdot 2\ H_2O$). Le chlorure ferrique hexahydraté peut également être cristallisé à partir d'une solution aqueuse acidifiée. Il est soluble dans l'eau, l'éthanol, l'éther diéthylique et l'acétone et forme habituellement des solvates, comme $FeCl_3 \cdot 2\ C_2H_5OH$. L'hydrolyse et l'hydroxylation s'effectuent dans la solution aqueuse de sorte qu'une solution à 5 p. 100 a un pH de 1,7. Au repos, les composés gélatineux hydroxylés com-

mencent à précipiter. Lorsqu'on l'assèche à des températures spécifiques, le chlorure ferrique hexahydraté produit des espèces moins hydratées (Bailar, 1973; Kirk-Othmer, 1981).

Les solutions aqueuses de chlorure ferrique sont très acides. Elles dissolvent les métaux électropositifs, comme le magnésium, en dégageant de l'hydrogène, et libèrent du dioxyde de carbone en réagissant avec les carbonates alcalins métalliques tout en précipitant dans les deux cas l'hydroxyde de fer (III) FeO(OH). L'hydrolyse de l'ion ferrique hexahydraté dans une solution diluée peut être représentée par les équations suivantes:

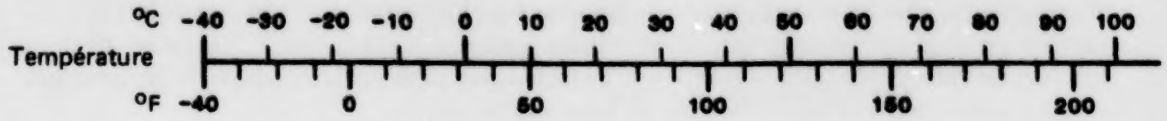
Jaune

1. $[Fe(OH)_6]^{+3} + H_2O \rightleftharpoons [Fe(H_2O)_5\,(OH)]^{+2} + H_3O^+$
2. $[Fe(H_2O)_5\,(OH)]^{+2} + H_2O \rightleftharpoons [Fe(H_2O)_4\,(OH)_2]^{+} + H_3O^+$
3. $[Fe(H_2O)_4\,(OH)_2]^{+} + H_2O \rightleftharpoons [Fe(H_2O)_3\,(H_2O)_3] + H_3O^+$
4. $[Fe(OH)_3\,(H_2O)_3 \rightleftharpoons FeO(OH)\downarrow + 4\,H_2O$

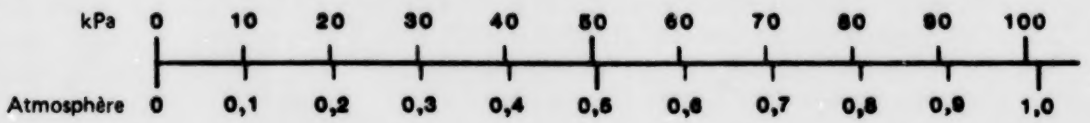
Le degré d'hydrolyse est très élevé, même à des pH de 2 à 3. Pour obtenir une solution constituée principalement de l'ion ferrique hexahydraté $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$, le pH de la solution doit se situer près de 0. Cet ion donne à la solution une coloration pourpre pâle, tandis que les différentes espèces hydroxylées (équations 1 et 2) sont jaunes, de sorte que les solutions aqueuses de sels ferriques, incluant celles possédant des anions non complexants, ont une coloration jaune sauf si elles sont très acides. Lorsque le pH dépasse 3, la réaction la plus courante est celle qui est décrite par les équations 2 et 3, et l'hydroxyde ferrique est précipité en une masse rouge brunâtre gélatineuse. Dans des solutions plus concentrées de chlorure ferrique, les ions chlorure entrant dans la sphère de coordination de l'atome de fer, et les espèces octaédriques prédominent $[FeCl_4\,(H_2O)_2]^-$. Si on ajoute de l'acide chlorhydrique à la solution concentrée, il se forme une espèce polymérique qui consiste en une suite alternante de $FeCl_4$ tétraédrique et de $FeCl_4\,(H_2O)_2$ octaédrique avec les unités adjacentes qui se partagent un ion chlorure. D'autre part, les solutions diluées de chlorure ferrique (0,68 *M*) dans de l'acide chlorhydrique concentré contiennent principalement l'anion tétrachloroferrate (III) $FeCl_4^-$. Il existe d'autres complexes chlorés dans les composés cristallins comme $FeCl_6^{3-}$ et $Fe_2Cl_9^{3-}$ (Bailar, 1973; Cotton, 1972).

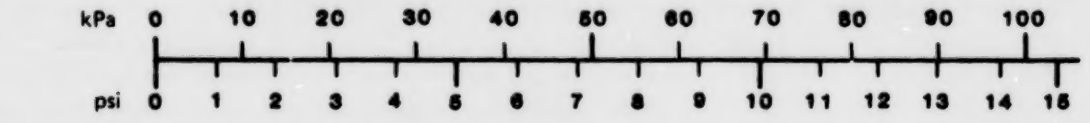
Tableau 1

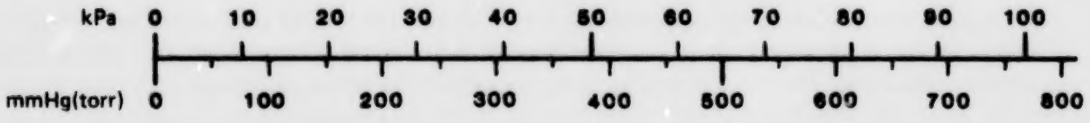
CHLORURE FERRIQUE — **NOMOGRAMMES DE CONVERSION**



Pression — 1 kPa = 1 000 Pa







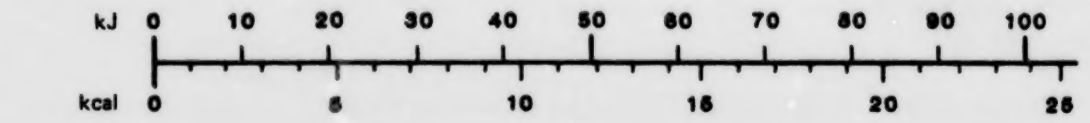
Viscosité

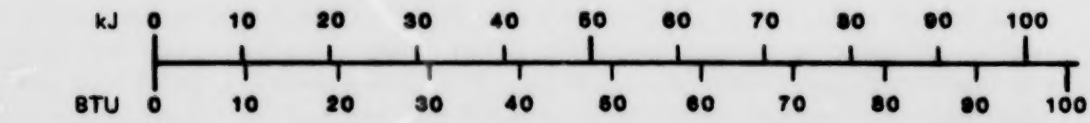
Dynamique — 1 Pa·s = 1 000 centipoises (cPo)

Cinématique — 1 m^2/s = 1 000 000 centistokes (cSt)

Teneur (de l'eau)
1 ppm ≅ 1 mg/l

Énergie (chaleur) — 1 kJ = 1 000 J





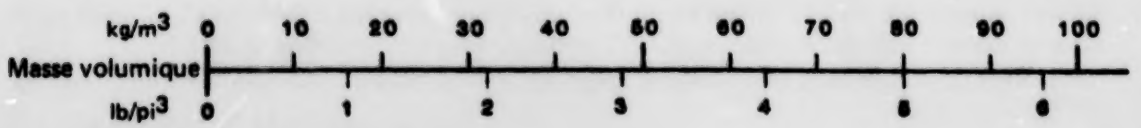


Figure 1

CHLORURE FERRIQUE

DIAGRAMME DE PHASE DE $FeCl_3 \cdot H_2O$

Référence: Linke, 1958

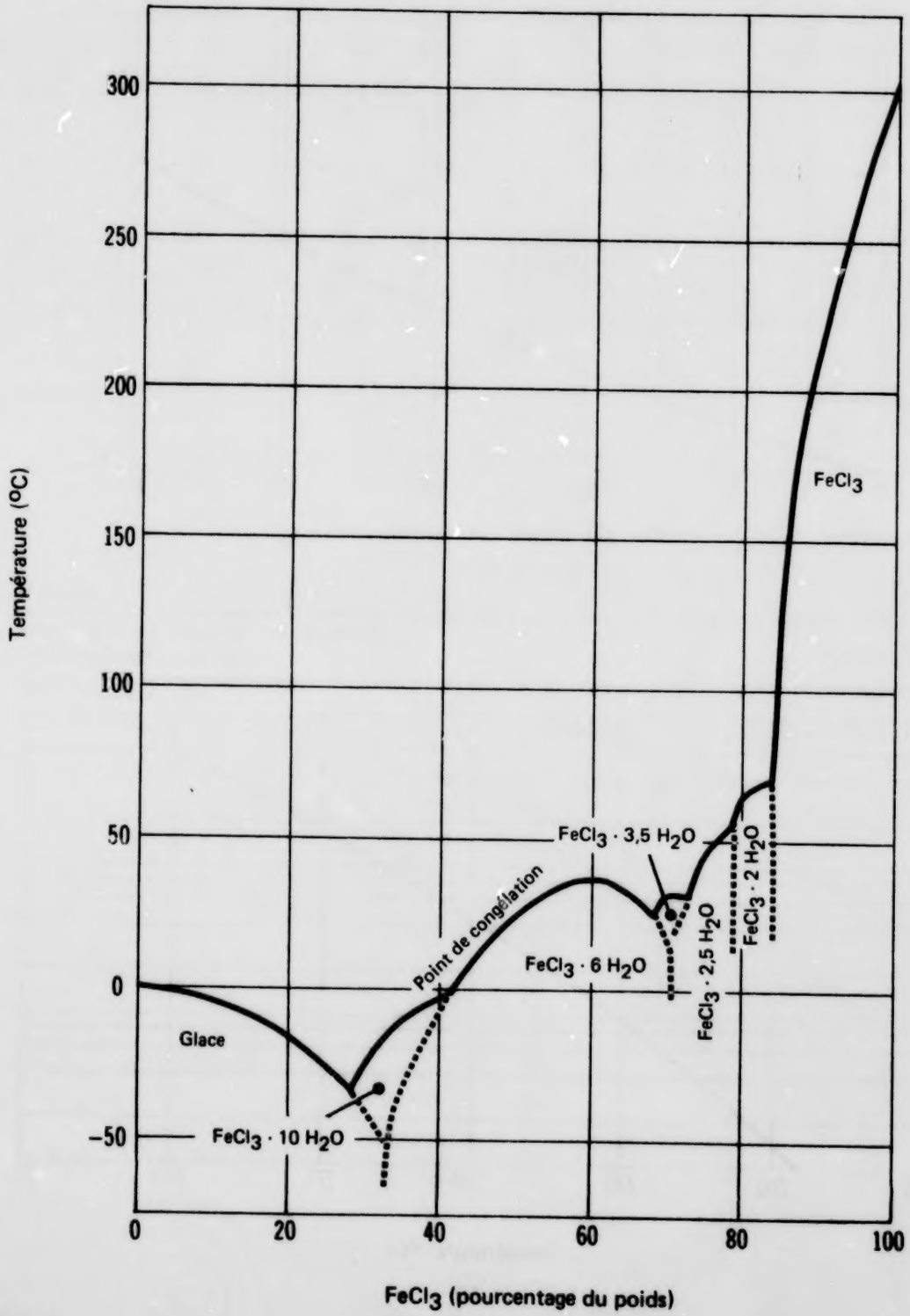


Figure 2

CHLORURE FERRIQUE (hexahydraté)

MASSE VOLUMIQUE DES SOLUTIONS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Référence: CRC, 1982

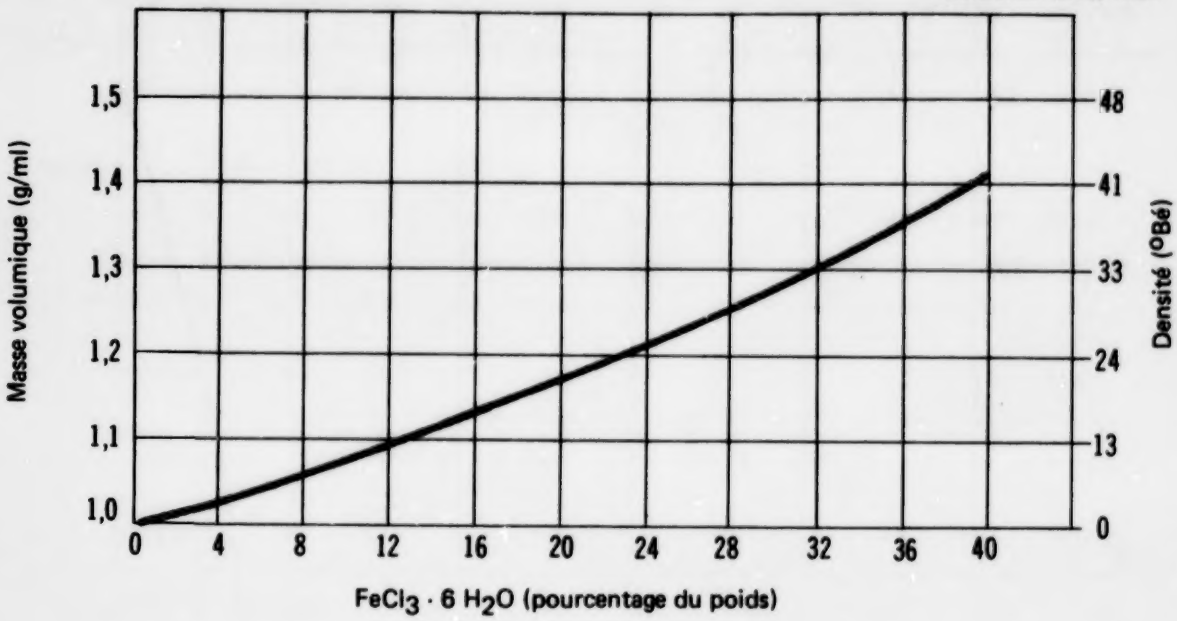


Figure 3

CHLORURE FERRIQUE

TENSION DE VAPEUR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Référence: CRC, 1982

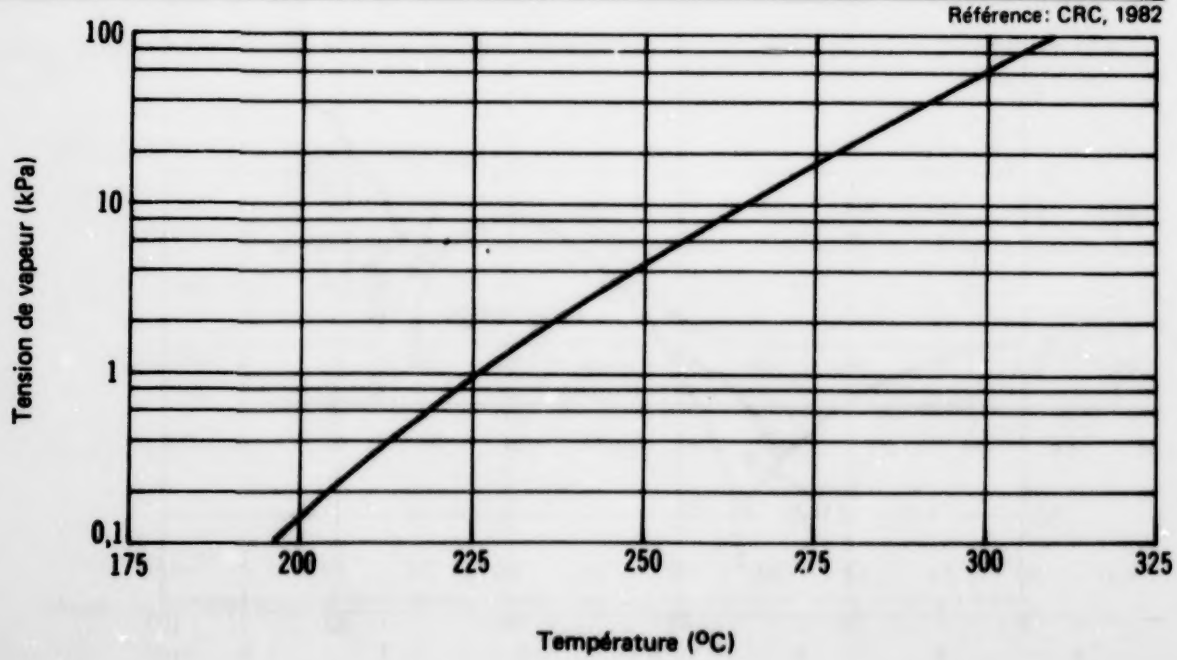
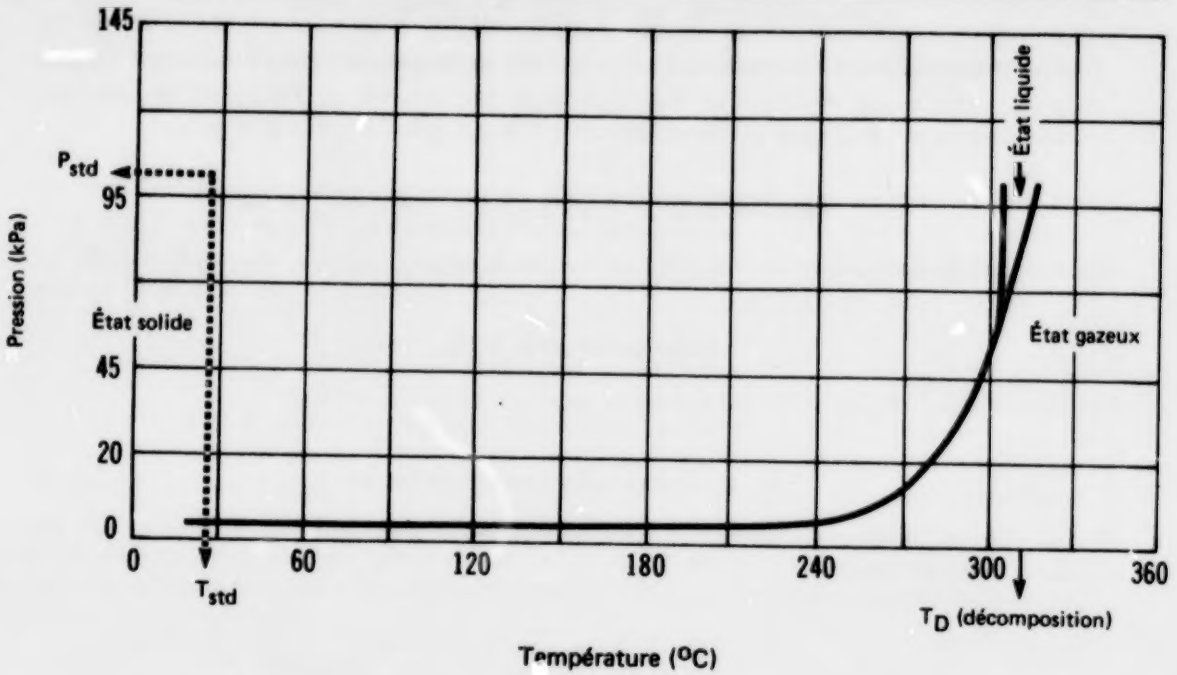


Figure 4

CHLORURE FERRIQUE — **DIAGRAMME DE PHASE**



3 PRODUCTION, TRANSPORT ET COMMERCE

3.1 Qualités et teneurs (PC, 1981; Ullmann, 1975)

Le chlorure ferrique est vendu au Canada à l'état solide anhydre (96 p. 100 à 99 p. 100 de $FeCl_3$), à l'état solide hexahydraté $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$ (60 p. 100 de $FeCl_3$) et en solutions (qualités coagulation et floculation) dont la teneur peut varier de 29 p. 100 à 46 p. 100.

3.2 Fabricants situés au Canada (CCR, 1978; Scott, 1979)

Diversey Corporation of Canada, 2645 Royal Windsor Drive, Mississauga, Ontario, L5G 1L1, (416) 291-1137

3.3 Autres fournisseurs (CBG, 1980)

Pennwalt of Canada Ltd., 700 Third Lane, Oakville, Ontario, L6J 5A3, (416) 827-9841

3.4 Itinéraires utilisés pour le transport

Le chlorure ferrique est surtout utilisé dans les stations d'épuration des eaux usées, et il est expédié partout au Canada.

3.5 Volume de production (PC, 1981)

Société	Ville	Province	Capacité nominale kilotonnes/an (1981)
Diversey Wyandotte	Mississauga	Ontario	23 (solutions)

3.6 Fabrication industrielle (PC, 1981)

3.6.1 Information générale. – Les solutions de chlorure ferrique sont préparées soit par réaction de l'acide chlorhydrique en présence d'oxyde ferrique, soit par chloruration de liqueurs usées de décapage de l'acier (les décapants sont des acides chlorhydriques, sulfuriques ou phosphoriques employés pour enlever les incrustations, les oxydes ou d'autres impuretés de la surface de l'acier).

3.6.2 Matières premières

Acide chlorhydrique
Oxyde ferrique de bonne qualité
Liqueurs usées de décapage de l'acier
Chlore

3.6.3 Procédé de fabrication. – Il existe deux procédés de fabrication du chlorure ferrique (Campbell, 1982).

a) De l'oxyde de fer en gâteau sec (magnétite) provenant des aciéries et de la poussière riche en fer provenant des fours sont transformés en coulis puis transférés dans un réacteur. Du chlorure d'hydrogène anhydre (sous-produit de l'élaboration des hydrocarbures chlorés) est ensuite ajouté. La solution de chlorure ferrique obtenue contient des impuretés et doit être purifiée avant d'être emmagasinée et expédiée aux utilisateurs. La réaction globale est la suivante:

$$Fe_2O_3 + 6\ HCl \rightarrow 2\ FeCl_3 + 3\ H_2O$$

Au Canada, une pénurie de magnétite ainsi que son coût de plus en plus élevé ont obligé l'industrie à mettre au point un deuxième procédé de fabrication.

b) On obtient du chlorure ferrique à partir de la liqueur usée de décapage de l'acier traitée avec du chlore:

$$2\ FeCl_2 + Cl_2 \rightarrow 2\ FeCl_3$$

Le chlore peut également être considéré comme un sous-produit de l'industrie de la soude caustique. Il peut arriver que la liqueur usée de décapage de l'acier contienne du sulfate ferreux au lieu de chlorure ferreux. On la traite avec du chlore, et on obtient une solution qui contient des ions sulfate et des ions chlorure en plus des ions ferriques. Ce produit est acceptable parce qu'il contient des ions ferriques qui constituent l'ingrédient actif dans le traitement des eaux. On effectue ensuite une purification de la solution, et on la prépare pour son expédition.

3.7 Principales utilisations au Canada (PC, 1981; Campbell, 1982)

Le chlorure ferrique en solution sert à la coagulation et à la floculation dans les stations d'épuration des eaux usées. On l'emploie également comme réactif chimique et pour graver les circuits imprimés électroniques. On l'utilise aussi dans l'élimination des phosphates des effluents des stations d'épuration des eaux usées.

3.8 Principaux acheteurs au Canada

Les stations d'épuration des eaux usées et de purification de l'eau potable constituent les principaux acheteurs de chlorure ferrique.

4 MANUTENTION DU PRODUIT ET COMPATIBILITÉ

4.1 Citernes et autres récipients d'expédition

4.1.1 Information générale. – Le transport en vrac des solutions de chlorure ferrique se fait par wagon-citerne et véhicule-citerne routier spécialement conçus à cette fin.

Le chlorure ferrique à l'état solide anhydre ou sec est expédié dans des fûts, des sacs et d'autres récipients de petite taille. Il est plus corrosif pour les métaux sous forme hexahydratée ($FeCl_3 \cdot 6\,H_2O$) que sous forme anhydre, et on doit l'expédier par conséquent dans des récipients non métalliques ou dans des récipients garnis d'un revêtement intérieur.

4.1.1.1 Wagons-citernes. – On emploie d'ordinaire pour le transport du chlorure ferrique en solution les wagons-citernes de type CCT/DOT A-1, classe 103 et A-8, classe 111A, dont les spécifications sont données au tableau 2.

Tableau 2
Spécifications des wagons-citernes (RTDCR, 1974; TCM, 1979)

Numéro de spécification CCT/DOT*	Description
103 BW	Citerne en acier soudé par fusion, avec dôme, isolée ou non isolée, garnie d'un revêtement intérieur en caoutchouc. Organes de déchargement par le haut exigés. Organes de déchargement par le bas et orifice de purge par le bas interdits. Pression d'essai de 414 kPa (60 psi).
111A60W5	Citerne en acier soudé par fusion, sans dôme, isolée ou non isolée, garnie d'un revêtement intérieur en caoutchouc. Marge de remplissage minimale de 2 p. 100. Indicateur de niveau. Organes de déchargement par le haut exigés. Organes de déchargement par le bas et orifice de purge par le bas interdits. Pression d'essai de 414 kPa (60 psi).
111A100W5	Citerne en acier soudé par fusion, sans dôme, isolée ou non isolée, garnie d'un revêtement intérieur en caoutchouc. Marge de remplissage minimale de 2 p. 100. Indicateur de niveau. Organes de déchargement par le haut exigés. Organes de déchargement par le bas et orifice de purge par le bas interdits. Pression d'essai de 690 kPa (100 psi).

* CCT/DOT: Commission canadienne des transports/Department of Transportation (États-Unis).

4.1.1.2 Véhicules-citernes routiers. – Le chlorure ferrique en solution est souvent transporté par camion-citerne. La capacité des camions-citernes dépend des règlements provinciaux qui s'appliquent au poids des camions (FC). Le camion à essieu double, d'une capacité de 12 700 l à 19 000 l (2800 gal à 4200 gal) ou d'une masse nette de 18 200 kg à 27 300 kg (40 000 lb à 60 000 lb) respectivement, est le véhicule le plus employé pour le transport du chlorure ferrique en solution (PC, 1972).

Comme les wagons-citernes, ces véhicules-citernes routiers sont déchargés au moyen d'air comprimé dont la pression n'excède pas 207 kPa (30 psi) (HFC, 1965).

Les véhicules-citernes routiers doivent être conformes à la spécification TC307 de Transports Canada décrite au tableau 3 (TDGC, 1980). Les matériaux de fabrication des camions-citernes

ainsi que l'épaisseur des matériaux sont similaires à ceux des wagons-citernes. Les véhicules-citernes routiers doivent faire l'objet d'un essai avec une pression minimale de 276 kPa (40 psi) afin de s'assurer qu'ils peuvent subir la pression de 207 kPa (30 psi) de l'air comprimé employé pour le déchargement par le haut. La pression de service maximale de la citerne est en fait de 207 kPa (30 psi).

Tableau 3
Spécifications des véhicules-citernes routiers

Numéro de spécification de Transports Canada	Description
TC307 (incorporant MC304 et MC307)	Citerne en acier soudé bout à bout. Conception et construction conformes au code ASME si le déchargement se fait au moyen d'air comprimé dont la pression excède 345 kPa. Pression minimale prévue de 172 kPa. Indicateur de niveau exigé. Au moins un dispositif régulateur de pression par compartiment. Au moins un trou d'homme de 380 mm (15 po) de diamètre par compartiment. Orifice de purge par le bas optionnel. Marge de corrosion exigée. Pression d'essai minimale de 276 kPa (40 psi).

4.1.2 Emballages. – Le chlorure ferrique anhydre peut également être expédié dans des fûts et des sacs. Les sacs doivent être en papier multi-plis de 3 couches au minimum, être à l'épreuve de l'humidité et avoir une masse nette maximale de 50 kg (110 lb) (TDGC, 1980).

De nombreux matériaux sont autorisés pour la fabrication des fûts. Le tableau 4 donne la description des différents types de fûts employés pour le transport du chlorure ferrique (TDGC, 1980).

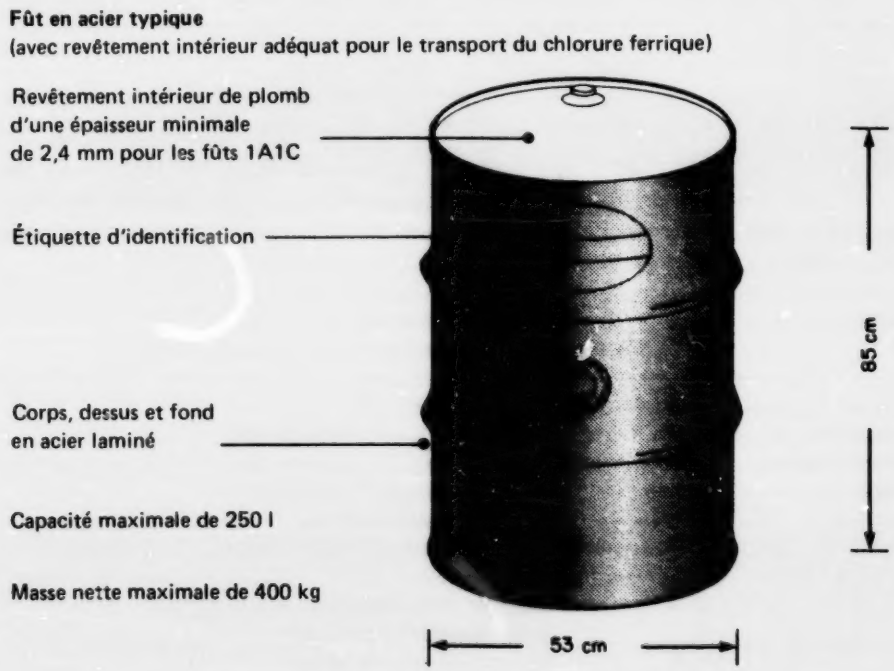
Tableau 4
Fûts employés pour le transport du chlorure ferrique

Type de fût	Numéro de code	Description	Illustré à la figure
Acier	1A1	Dessus non amovible, réutilisable	non illustré
	1A1A	1A1 avec rebords renforcés	non illustré
	1A1B	1A1 avec brides de fermeture soudées	non illustré
	1A1C	1A1 plombé	5
	1A1D	1A1 avec revêtement (autre que le plomb)	non illustré
	1A2	Dessus amovible, réutilisable	non illustré
	1A2A	1A2 avec rebords renforcés	non illustré
	1A2B	1A2 plombé	non illustré
	1A3	Dessus non amovible, non réutilisable	non illustré
	1A4	Dessus amovible, non réutilisable	non illustré
Aluminium	1B1	Dessus non amovible	non illustré
	1B2	Dessus amovible	non illustré
Contreplaqué	1D2		
Carton	1G1	À enroulement droit, de capacité maximale de 250 l et de masse nette maximale de 400 kg	non illustré
Plastique	1H1	Dessus non amovible, de capacité maximale de 250 l et de masse nette maximale de 400 kg	non illustré

Type de fût	Numéro de code	Description	Illustré à la figure
	1H2	1H1 avec dessus amovible	non illustré
Acier avec récipient en plastique	6HA1	Fût en acier avec un récipient intérieur en plastique de capacité maximale de 225 l	non illustré
Contreplaqué avec récipient en plastique	6HD1	Fût en contreplaqué avec un récipient intérieur en plastique, d'une capacité maximale de 225 l	non illustré
Carton avec récipient en plastique	6HG1	Fût extérieur en carton à enroulement droit avec récipient intérieur de même forme en plastique, d'une capacité maximale de 225 l	non illustré

Figure 5

CHLORURE FERRIQUE — **FÛTS TYPIQUES**



4.2 Déchargement

4.2.1 Matériel et procédés de déchargement des wagons-citernes. – Avant de procéder au déchargement, il faut prendre les précautions suivantes (HFC, 1965):

- vérifier que le réservoir d'emmagasinage dans lequel est transvasé le chlorure ferrique a la capacité suffisante pour recevoir tout le contenu du wagon-citerne;
- le personnel ne doit en aucun cas pénétrer dans le wagon;

- les freins doivent être serrés, et les roues, calées, il faut installer un dispositif ou une aiguille de déraillement;
- il doit y avoir un quai de service offrant toutes les conditions de sécurité au poste de déchargement.

Pour effectuer le déchargement du wagon-citerne, il faut suivre les étapes suivantes (HFC, 1965):

- après avoir ouvert la soupape casse-vide, le raccord d'admission d'air et l'orifice de déchargement, raccorder la conduite de déchargement de 51 mm (2 po) à l'orifice de déchargement, et la conduite d'apport d'air comprimé de 25 mm (1 po) à l'orifice d'admission d'air. La pression d'air doit être abaissée à 207 kPa (30 psi) pour l'opération de déchargement du chlorure ferrique; la conduite d'air comprimé doit être munie d'une soupape de sûreté réglée à 242 kPa (35 psi);
- ouvrir le robinet de la conduite d'apport d'air comprimé et ouvrir le robinet de la conduite de déchargement afin de décharger le wagon-citerne;
- une fois le wagon-citerne déchargé, fermer le robinet de la conduite d'apport d'air comprimé et ouvrir la valve de l'évent pour réduire sa pression à la pression atmosphérique;
- pour fermer le wagon-citerne, suivre les étapes qui précèdent, mais dans l'ordre inverse.

4.2.2 Matériel et procédés de déchargement des véhicules-citernes routiers. – Le déchargement des camions-citernes de leur contenu de chlorure ferrique s'effectue de façon similaire à celui des wagons-citernes. La méthode de déchargement des wagons-citernes s'applique tout aussi bien au déchargement des camions-citernes (HFC, 1965).

4.2.3 Matériaux de fabrication et spécifications des organes de déchargement. – Les matériaux de fabrication des divers composants des organes de déchargement ainsi que leurs spécifications sont ceux qui sont généralement utilisés pour le transport du chlorure ferrique en solution. D'autres types de matériaux peuvent être employés dans certains cas. Le tableau 5 donne la liste des matériaux qui servent habituellement à la fabrication des organes de déchargement.

Les organes de l'équipement type de déchargement comprennent notamment les conduites et raccords, les raccords flexibles, les vannes et soupapes, les garnitures, les pompes et les réservoirs d'emmagasinage.

La corrosion de l'acier au carbone par les solutions aqueuses de chlorure ferrique dépend de plusieurs facteurs comme le pH de la solution, l'oxygène dissous dans l'eau, la température, les sels dissous et le temps de contact. Il est connu que les sels inorganiques sont extrêmement corrosifs pour l'acier (vitesse de corrosion dépassant 1,27 mm par année), que les sels acides ou neutres accélèrent la corrosion et que les sels alcalins ont une vitesse de corrosion plus lente. Il est également important de savoir si les sels ajoutés à la solution entraîneront une solubilité ou une insolubilité des produits de la réaction.

Les solutions de chlorure ferrique appartiennent à la catégorie des produits très corrosifs, principalement à cause de leur teneur en chlorure, leur caractère oxydant et leur acidité. Elles sont extrêmement corrosives pour l'acier au carbone, et on doit également limiter l'emploi du nickel et des alliages au nickel. Par exemple, les solutions acides contenant l'ion ferrique oxydant accélèrent la corrosion de l'alliage «B» (62 p. 100 à 70 p. 100 de Ni et 28 p. 100 de Mo). Les ions ferriques fournissent par de fortes et rapides réactions un support à la dissolution anodique du nickel et du molybdène. L'ion ferrique est réduit en ion ferreux, et si la solution contient suffisamment d'oxygène dissous pour regénérer les ions ferriques, la corrosion se poursuit. On peut,

par contre, employer l'alliage «C» (59 p. 100 de Ni, 16 p. 100 de Mo et 16 p. 100 de Cr) sous 65 °C avec des teneurs limitées, alors que l'alliage «400» (65 p. 100 Ni et 32 p. 100) sera corrodé. Les aciers inoxydables 304 et 316 seront également très corrodés par les solutions de chlorure ferrique, et le chlorure produira même une corrosion par piqûres. Ces aciers sont aussi sujets à se fissurer sous l'effet de la corrosion combinée à la tension. Les matériaux les plus sûrs pour le transport du chlorure ferrique en solution (toutes teneurs et température jusqu'au point d'ébullition ou à la température limite du matériau non métallique) sont le tantale, les verres de quartz, du carbone imprégné de furanne ou de résine phénolique, le Téflon® (FEP/PTFE), la résine furannique et la résine époxy (CE, 1980).

Les conduites et les raccords en acier non allié sans soudure ASTM A106 n° 40 doublés ou garnis d'un revêtement en caoutchouc ou en fluorure de polyvinylidène sont recommandés pour le chlorure ferrique (HFC, 1965). Il faut employer des joints à brides et des raccords soudés. La première section de la conduite de déchargement devrait être un tuyau en caoutchouc robuste.

La conduite de déchargement doit avoir un diamètre de 51 mm (2 po) pour s'ajuster au coude réducteur en caoutchouc standard de 63 mm sur 51 mm des wagons-citernes utilisés pour le transport du chlorure ferrique en solution. On déconseille l'emploi de conduites dont le diamètre est inférieur à 25 mm (1 po). Il est indispensable que les conduites extérieures puissent s'auto-drainer (HFC, 1965).

Les robinets à membranes en fonte ou en acier coulé, doublés de résine de chlorure de polyvinylidène conviendront le mieux pour le déchargement du chlorure ferrique (DPLV, 1972). On peut employer des joints en Viton.

On recommande l'emploi d'une pompe centrifuge, du type à admission unilatérale à entraînement magnétique, dépourvue de joints étanches, avec une extrémité d'admission en acier inoxydable 316. Toutefois, une pompe centrifuge caoutchoutée avec joints rotatifs et joints fixes en Téflon® peut convenir (HFC, 1965).

On se sert habituellement de réservoirs d'emmagasinage en acier soudé avec un revêtement intérieur de caoutchouc. Les surfaces exposées sont peintes avec une peinture résistante au chlorure ferrique (FC). Les réservoirs devraient pouvoir contenir une fois et demie la quantité de chlorure ferrique normalement expédiée (HFC, 1965).

4.3 Compatibilité du chlorure ferrique et des matériaux de fabrication

La compatibilité du chlorure ferrique et des matériaux qui entrent dans la fabrication de l'équipement de service est indiquée au tableau 5. Le système d'évaluation utilisé dans le tableau 5 est décrit brièvement ci-après.

Recommandé: Le matériau aura une performance satisfaisante avec l'application indiquée.

Avec réserves: Le matériau montrera des signes de détérioration avec l'application indiquée; il peut convenir pour un usage intermittent ou pour un service de courte durée.

Déconseillé: L'application indiquée causera une grave détérioration du matériau; son usage est donc déconseillé.

Tableau 5
Compatibilité du chlorure ferrique et de certains matériaux de fabrication

Application	État du chlorure ferrique		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
1. Conduites et raccords	> 5 p. 100	49 °C	Polyéthylène (DPPED, 1967)		
		52 °C	Chlorure de polyvinylidène (DCRG, 1978)		
		60 °C	Chlorure de polyvinyle I, chlorure de polyvinyle II (DPPED, 1967)		
		71 °C	Acrylonitrile-butadiène-styrène (DPPED, 1967)		
		107 °C	Polypropylène (DCRG, 1978)		
		121 °C	Polyéther chloré (DCRG, 1978)		
		135 °C	Fluorure de polyvinylidène (DCRG, 1978)		
		Jusqu'à la limite de tolérance du matériau	Chlorure de polyvinyle I, acrylonitrile-butadiène-styrène, polyéthylène (MWPP, 1978)		
			Caoutchouc ou acier non allié doublé de chlorure de polyvinylidène, Ébonite®, verre Pyrex®, tuyauterie en chlorure de polyvinyle (HFC, 1965)		
2. Robinetterie	> 5 p. 100	21 °C			Acier inoxydable 316 (JSSV, 1979)
3. Pompes	> 5 p. 100	93 °C	Ester vinylique avec joint torique en caoutchouc fluoré (Viton)		
		froide	Fonte à haute teneur en silicium (HIS, 1969)		
4. Emmagasinage	> 5 p. 100 jusqu'à saturation		Acier non allié doublé de caoutchouc semi-dur, verre, résines phénoliques, résines époxy, chlorure de polyvinyle (HFC, 1965)		

Application	État du chlorure ferrique		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
	10 p. 100	20 °C	Titane, tantale (AMC)	Acier inoxydable 316 (ASS)	Aciers inoxydables 302, 304, 410, 430 (ASS) Zirconium (AMC)
	10 p. 100	65,5 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (rouge), ester vinylique renforcé de fibre de verre (argent) (AOS, 1982)		
	10 p. 100	93 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (Polythread) (AOS, 1982)		
	10 p. 100	96 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (vert), ester vinylique renforcé de fibre de verre (Chemline) (AOS, 1982)		
	10 p. 100	100 °C	Titane, titane-palladium, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	10 p. 100 à 100 p. 100	24 °C à 100 °C	Verre (CDS, 1967)		
	10 p. 100 à 100 p. 100	24 °C à 52 °C	Bois (CDS, 1967)		
	10 p. 100 à 100 p. 100	84 °C			Béton (CDS, 1967)
	10 p. 100 à 100 p. 100	100 °C			Bois (CDS, 1967)
	20 p. 100	20 °C	Titane, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	20 p. 100	100 °C	Titane, titane-palladium, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	30 p. 100	20 °C	Titane, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	40 p. 100	65,5 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (rouge), ester vinylique renforcé de fibre de verre (argent) (AOS, 1982)		
	40 p. 100	93 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (Polythread) (AOS, 1982)		
	40 p. 100	96 °C	Ester vinylique renforcé de fibre de verre (vert), ester vinylique renforcé de fibre de verre (Chemline) (AOS, 1982)		

Application	État du chlorure ferrique		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
5. Autres	1 p. 100; au repos	21 °C	Aciers inoxydables 304, 304L, 316, 316L, 321, 347, nickel (SFC, 1982)	Monel®, Inconel® (SFC, 1982)	
	1 p. 100, au repos	Point d'ébullition		Aciers inoxydables 316, 316L (SFC, 1982)	Aciers inoxydables 304, 304L, 321, 347, nickel, Monel®, Inconel® (SFC, 1982)
	5 p. 100, au repos	21 °C		Aciers inoxydables 316, 316L, Inconel® (SFC, 1982)	Aciers inoxydables 304, 304L, 321, 347, nickel, Monel® (SFC, 1982)
	5 p. 100, agité	21 °C	Niobium, Hastelloy® C-276 (CE, 1983)	Aciers inoxydables 304, 304L, 316*, 316L, 321, 347, Inconel® (SFC, 1982)	Nickel, Monel® (SFC, 1982) Alliage «20», Hasteïloy® B2 (CE, 1983)
	5 p. 100, aéré	21 °C		Aciers inoxydables 304, 304L, 316, 316L, 321, 347, Inconel® (SFC, 1982)	Nickel, Monel® (SFC, 1982)
	5 p. 100	Température ambiante	Titane, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	5 p. 100	100 °C	Titane, titane-palladium, tantale (AMC)		Zirconium (AMC)
	jusqu'à 10 p. 100	40 °C	Chlorure de polyvinyle non plastifié, polyéthylène, polypropylène, polyoxyméthylène, caoutchouc naturel, acrylonitrile/butadiène (nitrile, Buna N), caoutchouc d'isobutylène/ isoprène (butyle), caoutchouc d'éthylène propylène, polychloroprène (néoprène), caoutchouc fluoré (Viton), polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon®) (GFPS)		

Application	État du chlorure ferrique		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
	100 p. 100	21 °C	Caoutchouc d'isobutylène/isoprène butyle, Gatron (CE, 1980)	Chlorure de polyvinyle chloré, élastomères polyestériques, caoutchouc fluoré (Viton) (CE, sept., 1980)	Acier non allié, aciers inoxydables 304 et 316, aluminium, cuivre (CE, sept., 1980)
	Solution saturée	21 °C	Fluorure de polyvinylidène (TPS, 1978)		
		60 °C	Chlorure de polyvinyle (TPS, 1978) Caoutchoucs naturels et plastiques mous (HFC, 1965)		
		65 °C	Alliage C, résines phénoliques		
		66 °C	Polypropylène (TPS, 1978)		
		71 °C	Polyéthylène, polystyrène, polyvinyle (HFC, 1965)		
	Solution saturée	80 °C	Polypropylène, acrylonitrile-butadiène-styrène, caoutchouc d'isobutylène/isoprène (butyle), caoutchouc d'éthylène-propylène, polychloroprène (néoprène), caoutchouc fluoré (Viton), polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon®) (GFPS)	Polyéthylène, polyoxyméthylène (GFPS)	Chlorure de polyvinyle non plastifié, caoutchouc naturel (GFPS)
	Solution saturée	82 °C	Revêtements intérieurs de caoutchoucs et de plastiques durs (HFC, 1965)	Polypropylène (TPS, 1978)	
	Solution saturée	85 °C	Chlorure de polyvinyle chloré (TPS, 1978) Verre, porcelaine, grès, brique anti-acide (HFC, 1965)		
	Solution saturée	100 °C	Acrylonitrile-butadiène (nitrile, Buna N), caoutchouc d'isobutylène/isoprène (butyle), caoutchouc d'éthylène-propylène, polychloroprène (néoprène), caoutchouc fluoré (Viton), polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon®) (GFPS)	Polypropylène (GFPS)	Chlorure de polyvinyle non plastifié, polyéthylène, polyoxyméthylène, caoutchouc naturel (GFPS)

Application	État du chlorure ferrique		Matériau recommandé	Réserves	Matériau déconseillé
	Teneur	Température			
	Non spécifiée	Non spécifiée	Verre/silicates, carbone imprégné de furanne, carbone imprégné de résine phénolique, polytétrafluoroéthylène, fluoroéthylène-propylène, résine furannique, résine époxy, (CE, septembre 1980)		
	100 p. 100	21 °C	Caoutchouc d'isobutylène/isoprène (butyle), Gatron (CE, septembre 1980)	Polyéthylène chlorosulfonique (Hypalon®), élastomère polyestérique, caoutchouc fluoré (Viton) (CE, septembre 1980)	Acier non allié, aciers inoxydables SS304, 316, aluminium, cuivre (CE, septembre 1980)

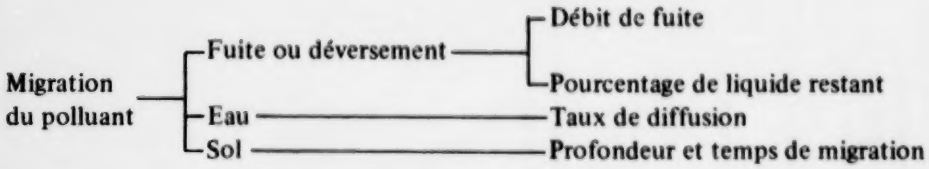
5 TRANSPORT DES POLLUANTS

5.1 Résumé

Le chlorure ferrique est parfois transporté à l'état solide. Toutefois, la plupart du temps, on l'expédie en solution aqueuse, dont la teneur peut varier de 29 p. 100 à 45 p. 100, dans des wagons-citernes ou des camions-citernes. Déversé dans l'eau, il se dissout rapidement, quel que soit son état. Déversé sur le sol, le chlorure ferrique en solution aqueuse se répand à la surface, puis pénètre dans le sol à une vitesse qui varie selon le type de sol et la teneur en eau de ce dernier. L'infiltration du chlorure ferrique jusqu'à la nappe phréatique peut créer des problèmes sur le plan de l'environnement.

Comme le chlorure ferrique n'est pas volatil, il n'y a pas à craindre de diffusion dans l'atmosphère.

Voici les facteurs à prendre en considération lorsqu'il y a migration du polluant dans l'eau ou dans le sol:



À cause du caractère approximatif des calculs dans le domaine de la migration des polluants, la méthode adoptée consiste à utiliser des estimations prudentes des paramètres critiques en prévision du pire. En suivant cette méthode, il se peut que l'on doive poser des hypothèses différentes pour chaque milieu. Cette méthode permet donc de comparer le comportement de différents produits chimiques dans les pires scénarios à partir d'hypothèses compatibles avec chaque milieu.

5.2 Fuite du chlorure ferrique

5.2.1 Introduction. – Le chlorure ferrique est parfois transporté à l'état solide mais surtout en solution aqueuse. Lorsqu'il est à l'état liquide, on l'expédie par wagon-citerne. Il existe une grande variété de modèles de wagons-citernes, de sorte que nous avons dû en choisir un en particulier pour établir les nomogrammes de fuite. Le modèle choisi a un diamètre de 2,75 m, une longueur de 13,4 m, et il peut contenir environ 80 000 l. Le même modèle a été adopté dans tous les manuels de la collection Enviroguide pour des raisons d'uniformité.

Si la paroi inférieure d'un wagon-citerne transportant du chlorure ferrique en solution aqueuse diluée est perforée, son contenu s'écoulera sous l'action de la pesanteur.

Grâce aux nomogrammes, on pourra calculer la quantité de liquide restant dans la citerne ainsi que le débit de fuite du liquide, à mesure que le temps s'écoulera. Comme les citernes ne sont pas sous pression et que le produit est peu volatil, aucun nomogramme n'a été élaboré sur la fuite éventuelle de vapeurs par un orifice situé sur le dessus de la citerne.

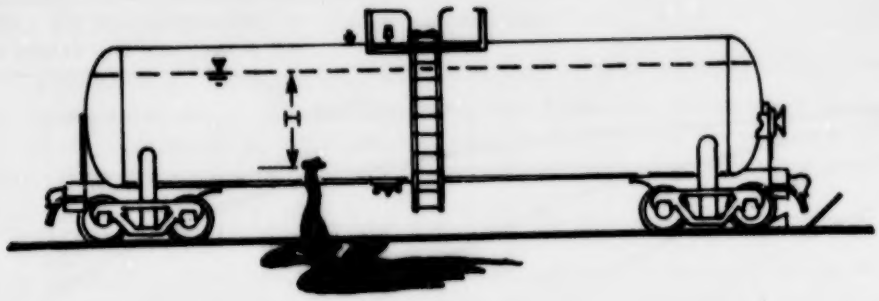


Figure 6 PERFORATION DE LA PAROI INFÉRIEURE D'UN WAGON-CITERNE

5.2.2 Nomogrammes de fuites

5.2.2.1 Pourcentage de liquide restant en fonction du temps d'écoulement. – La figure 7 permet d'évaluer le pourcentage de liquide restant dans un wagon-citerne en fonction du temps écoulé depuis le moment du bris et en fonction d'un certain nombre de diamètres de l'orifice. Ces diamètres sont des diamètres équivalents et valent pour des orifices de toutes formes.

On suppose que le wagon-citerne type a 2,75 mètres de diamètre et 13,4 mètres de longueur, qu'il contient 80 000 litres de liquide et qu'il est plein au moment du bris. Le volume de liquide restant, après un temps d'écoulement donné t, n'est pas seulement fonction du débit de fuite, mais aussi de la taille et de la forme du wagon-citerne.

5.2.2.2 Débit de fuite en fonction du temps d'écoulement. – La figure 8 permet d'évaluer à tout instant le débit de fuite après un temps d'écoulement donné t, en fonction de diamètres équivalents donnés. Le nomogramme ne vaut que pour un wagon-citerne dont le contenu initial est de 80 000 litres.

5.2.3 Exemples de calcul

PROBLÈME A

Il y a eu bris d'un wagon-citerne type (capacité de 80 000 l) rempli d'une solution aqueuse à 45 p. 100 de chlorure ferrique. L'orifice est situé dans le bas de la citerne. Son diamètre équivalent est de 150 mm. Quel pourcentage du volume initial de 80 000 l représente le volume de liquide restant après 10 minutes? Solution (voir figure 7): si t = 10 mn et D = 150 mm, le volume de liquide restant représente 36 p. 100 (soit 28 800 l) du volume initial.

PROBLÈME B

Les données du problème B étant les mêmes que celles du problème A, quel est le débit instantané après 10 minutes d'écoulement? Solution (voir figure 8) si t = 10 mn et D = 150 mm, le débit instantané q = 70 l/s.

5.3 Diffusion atmosphérique

Comme le chlorure ferrique est non volatil, le dégagement de vapeurs dans l'atmosphère est peu probable.

Figure 7

CHLORURE FERRIQUE

POURCENTAGE DE LIQUIDE RESTANT
EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCOULEMENT

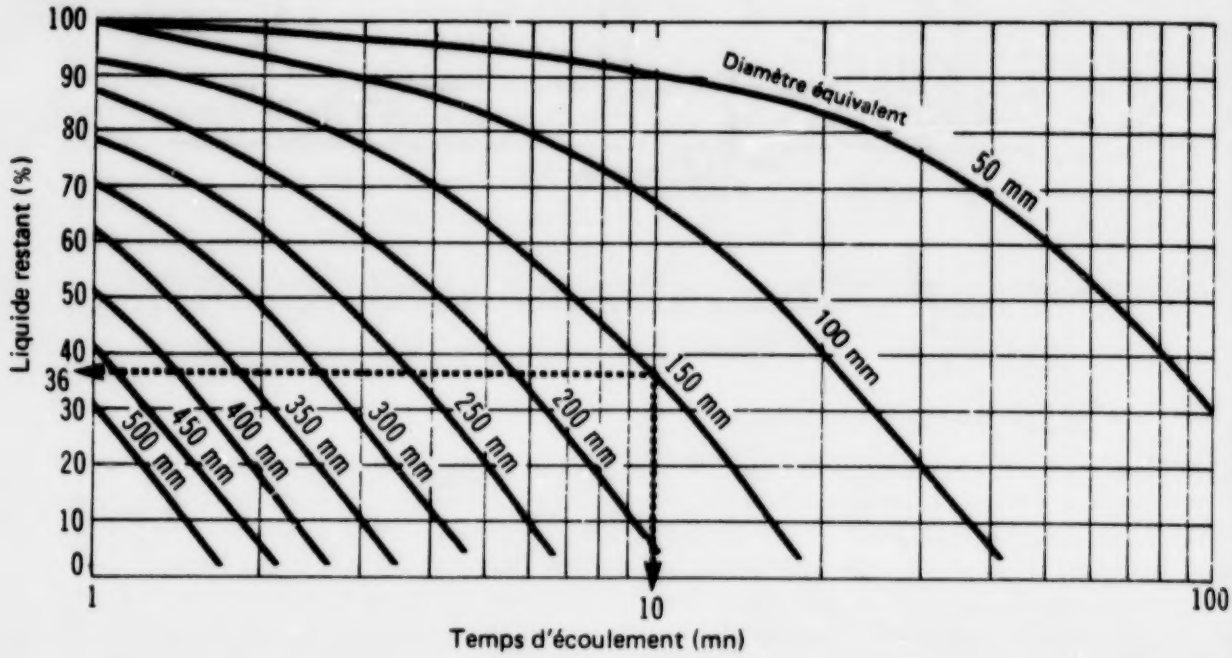
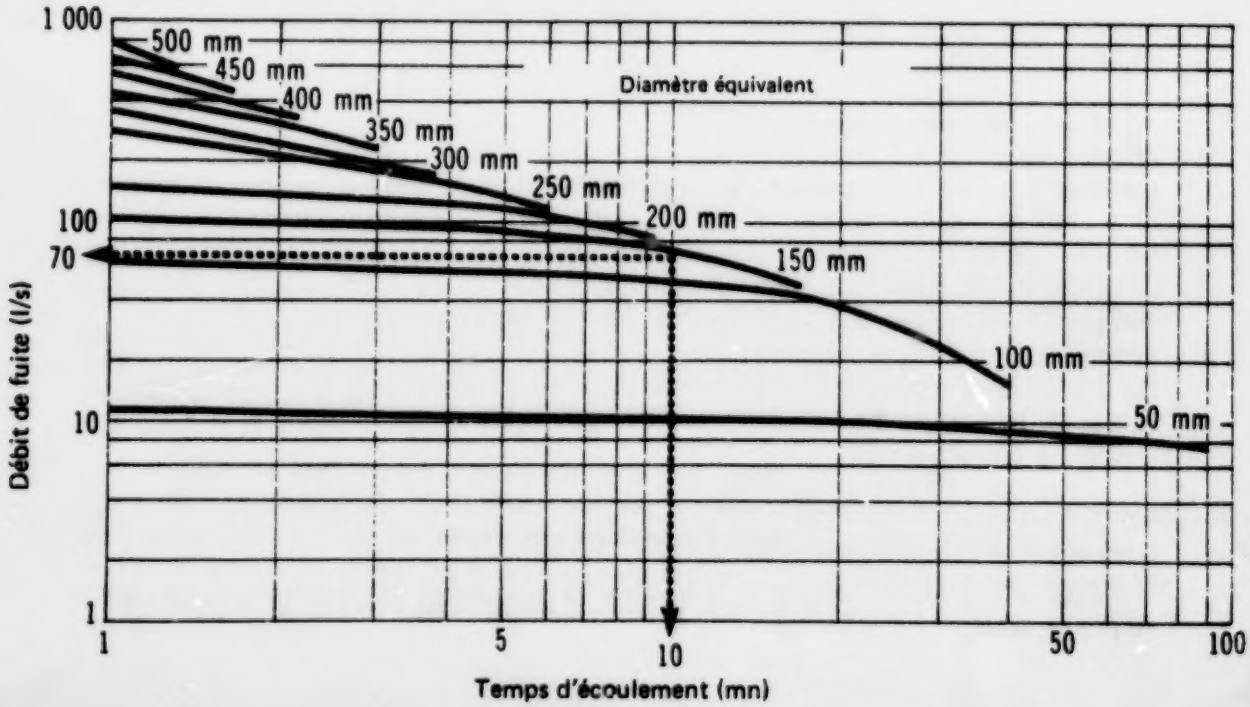


Figure 8

CHLORURE FERRIQUE

DÉBIT DE FUITE EN FONCTION DU TEMPS D'ÉCOULEMENT



5.4 Comportement dans l'eau

5.4.1 Introduction. – Lorsque le chlorure ferrique à l'état solide ou en solution est déversé dans l'eau, il se dissout ou se mélange rapidement. En général, le phénomène de mélange peut être décrit par les équations de diffusion classiques, comportant un ou plusieurs coefficients de diffusion. Dans les rivières, le mélange est surtout le résultat d'un écoulement turbulent, alors que dans une étendue d'eau calme, il s'effectue par diffusion moléculaire.

Au chapitre 2 du présent manuel, il a déjà été question de l'hydrolyse de l'ion ferrique dans toutes les eaux, sauf en eau très acide. Les ions hydroxyles ont souvent une plus grande affinité pour les ions ferriques que les bases organiques ou inorganiques. Les ions ferriques ont de plus une tendance marquée à former des complexes en solution aqueuse. Par exemple, ils réagissent avec les orthophosphates et forment le complexe soluble $FeHPO_4^+$, qui en conditions acides précipite en $FePO_4$. En eau neutre ou légèrement basique, le précipité est un composé métastable contenant à la fois les ions PO_4^{3-} et OH^- en proportions qui varient en fonction du pH. L'ion ferrique hydrolysé forme les espèces mononucléaires $[Fe(H_2O)_5OH]^{2+}$ et $[Fe(H_2O_4(OH)_2]^{1+}$. Les autres espèces identifiées sont $[Fe(H_2O)_4(OH)_2Fe(H_2O)_4]^{4+}$, $[Fe_3(H_2O)_4(OH)_4]^{5+}$ et $[Fe(H_2O)_2(OH)_4]^{1-}$. Lorsque le pH se situe entre 5 et 8, l'ion ferrique ne peut rester en solution et forme soit un complexe soit une suspension. En général un tel pH entraînera, à partir de l'ion ferrique, la formation d'oxyde ferrique aqueux FeO(OH) en suspension. Lorsqu'il est déversé dans l'eau, la forme de l'ion ferrique dépendra des conditions de l'eau, et ce dernier abaissera le pH de l'eau dans son voisinage immédiat (Cotton, 1972, Hesse, 1972; Water Analysis, 1982).

Pour évaluer la teneur en polluant de l'eau d'une rivière en aval d'un lieu de déversement, les auteurs ont utilisé un modèle de diffusion turbulente. Ce modèle s'applique aux liquides miscibles dans l'eau, de densité équivalente à celle de l'eau, et aux solides qui se dissolvent dans l'eau. Comme la densité relative du chlorure ferrique est supérieure à celle de l'eau initialement, la teneur maximale devrait être observée près du fond dans les premières heures qui suivent le déversement. Lorsque le mélange s'effectue, la teneur devient uniforme.

Le modèle utilisé est unidimensionnel; il établit un canal rectangulaire théorique et suppose une teneur uniforme en polluant dans toute la section donnée de l'écoulement (section mouillée). En pratique, une telle uniformité n'est possible qu'en des points situés assez loin en aval du lieu du déversement, là où les mécanismes de mélange et de dilution ont joué suffisamment pour produire une répartition égale du polluant à travers le canal. Le modèle s'applique aux rivières dont le rapport largeur/profondeur est inférieur à 100. Il postule également un coefficient de rugosité de Manning de 0,03. (Pour plus de détails au sujet de ce modèle, voir le *Manuel d'introduction* Enviroguide.)

En ce qui a trait à la diffusion moléculaire dans une étendue d'eau calme, aucun modèle n'a été élaboré. Les auteurs ont établi des nomogrammes permettant de délimiter la zone dangereuse et de calculer la teneur moyenne dans cette zone en fonction de la masse de liquide déversé, indépendamment du temps écoulé.

5.4.2 Nomogrammes de diffusion du polluant dans l'eau. – Le lecteur trouvera ci-après la liste des nomogrammes servant à déterminer les teneurs en polluant dans les rivières non soumises aux marées et dans les étendues d'eau calme.

A. – Rivières non soumises aux marées

Figure 9 Distance en fonction du temps pour une plage de vitesses moyennes de l'écoulement.

Figure 10 Rayon hydraulique en fonction de la largeur du canal pour une plage de profondeurs du canal (hauteurs d'eau).

Figure 11 Coefficient de diffusion turbulente en fonction du rayon hydraulique pour une plage de vitesses moyennes de l'écoulement.

Figure 12 Alpha* en fonction du coefficient de diffusion turbulente pour différentes valeurs de temps écoulé.

Figure 13 Delta* en fonction de alpha pour différentes masses de liquide déversé.

Figure 14 Teneur maximale en fonction de delta pour des sections mouillées de différentes surfaces.

B. – Étendues d'eau calme ou lacs (au repos)

Figure 15 Volume d'eau en fonction du rayon de la zone dangereuse pour différentes profondeurs du lac (hauteurs d'eau).

Figure 16 Teneur moyenne en fonction du volume d'eau de la zone dangereuse pour différentes masses de liquide déversé.

La figure 17 présente les étapes à suivre pour évaluer la teneur en un point en aval après un déversement et indique les nomogrammes à utiliser; ces derniers (figures 9 à 16) sont expliqués dans les paragraphes qui suivent.

5.4.2.1 Diffusion dans les rivières non soumises aux marées

Figure 9. Distance en fonction du temps. – Le nomogramme montre les relations entre la vitesse moyenne de l'écoulement, le temps écoulé et la distance parcourue. Pour une vitesse moyenne de l'écoulement V donnée, le temps t que met le polluant pour atteindre un point situé à une distance x donnée en aval du lieu du déversement peut être obtenu rapidement à l'aide du nomogramme.

Figure 10. Rayon hydraulique en fonction de la largeur du canal. – Le modèle choisi pour évaluer la teneur en polluant en aval du lieu du déversement comporte un canal rectangulaire théorique de largeur L, ayant une hauteur d'eau h. Le rayon hydraulique r doit être connu pour calculer le coefficient de diffusion turbulente E. Le rayon hydraulique lui-même correspond au rapport de la surface de la section s mouillée (ou section de l'écoulement) au périmètre mouillé B. Le nomogramme permet de déterminer le rayon hydraulique d'un canal à partir de la largeur de ce dernier et de la hauteur d'eau.

Figure 11. Coefficient de diffusion turbulente en fonction du rayon hydraulique. – Les données connues sur le rayon hydraulique r et sur la vitesse moyenne de l'écoulement V permettent de déterminer le coefficient de diffusion turbulente E.

Figure 12. Alpha en fonction du coefficient de diffusion turbulente. – Le nomogramme permet d'obtenir le facteur de conversion α; ce dernier est fonction du coefficient de diffusion turbulente E et du temps t requis pour atteindre un point situé en aval du lieu du déversement.

Figure 13. Delta en fonction de alpha. – Un second facteur de conversion, delta Δ, est requis pour évaluer la teneur en polluant en un point donné. Delta est fonction d'alpha et de la masse du liquide déversé.

Figure 14. Teneur maximale en fonction de delta. – Il s'agit de la dernière étape dans la détermination de la teneur maximale en polluant en un point situé en aval du lieu du déversement. En se servant du facteur delta et connaissant la surface de la section mouillée s, il est facile de trouver la teneur. La valeur obtenue vaut pour les liquides miscibles dans l'eau, de densité équivalente à celle de l'eau, et pour les solides solubles dans l'eau; elle variera quelque peu dans le cas de polluants dont la densité relative est supérieure ou inférieure à celle de l'eau.

* Alpha et delta ne sont que des facteurs de conversion; leur utilité est de faciliter le calcul des teneurs en aval du lieu du déversement.

Figure 9

CHLORURE FERRIQUE — DISTANCE EN FONCTION DU TEMPS

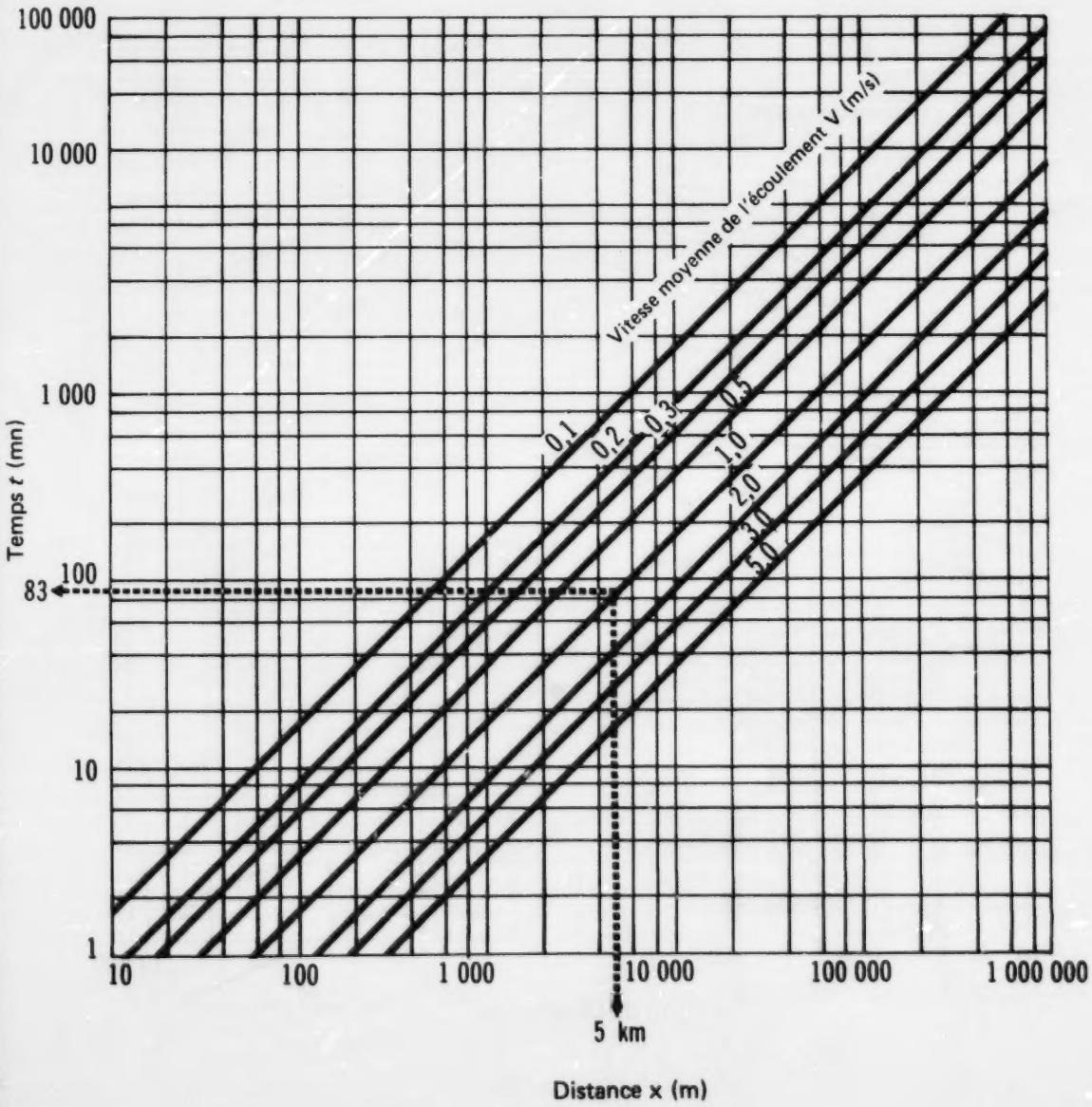


Figure 10

CHLORURE FERRIQUE

RAYON HYDRAULIQUE EN FONCTION DE LA LARGEUR DU CANAL

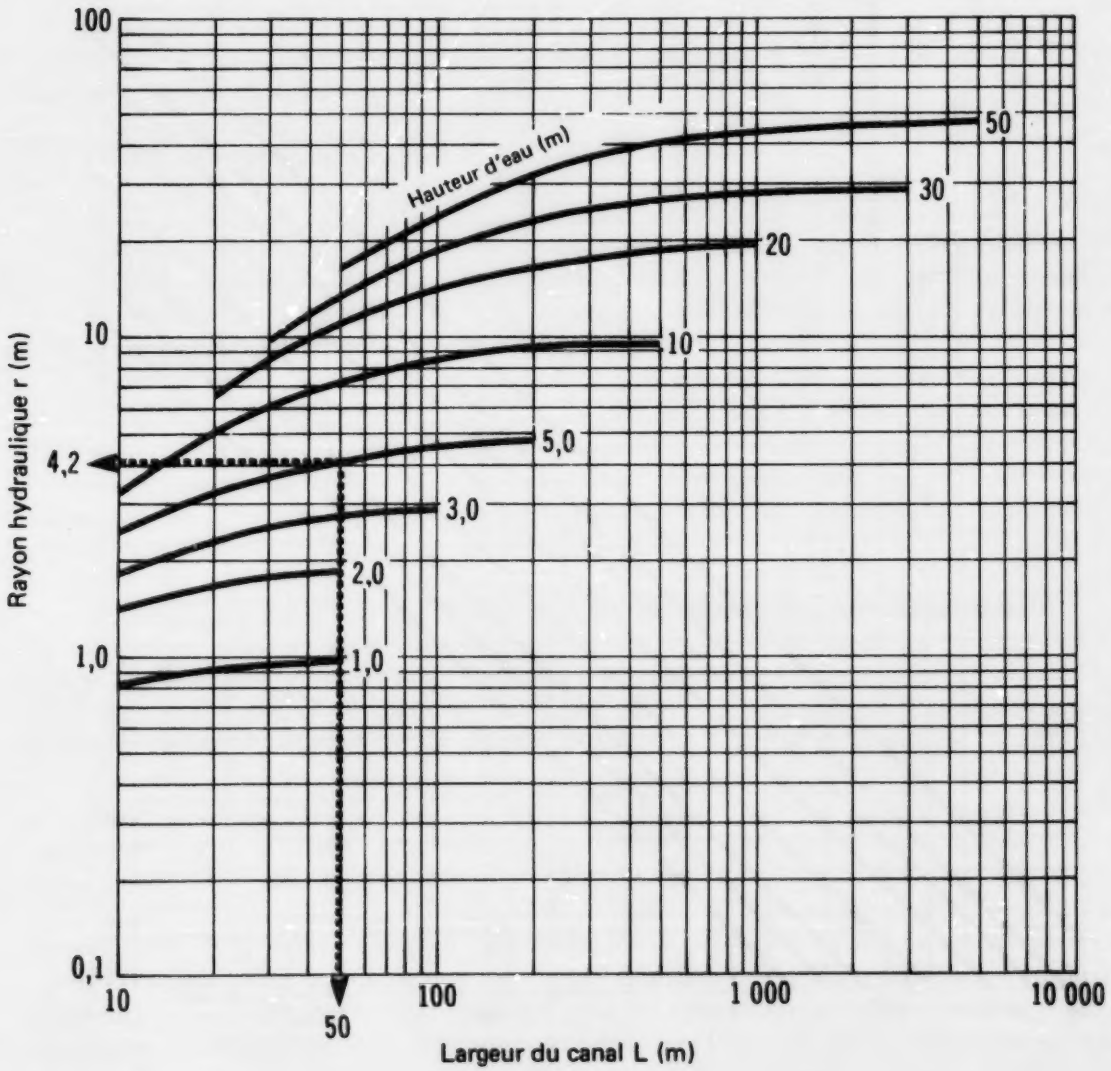


Figure 11

CHLORURE FERRIQUE

COEFFICIENT DE DIFFUSION TURBULENTE EN FONCTION DU RAYON HYDRAULIQUE

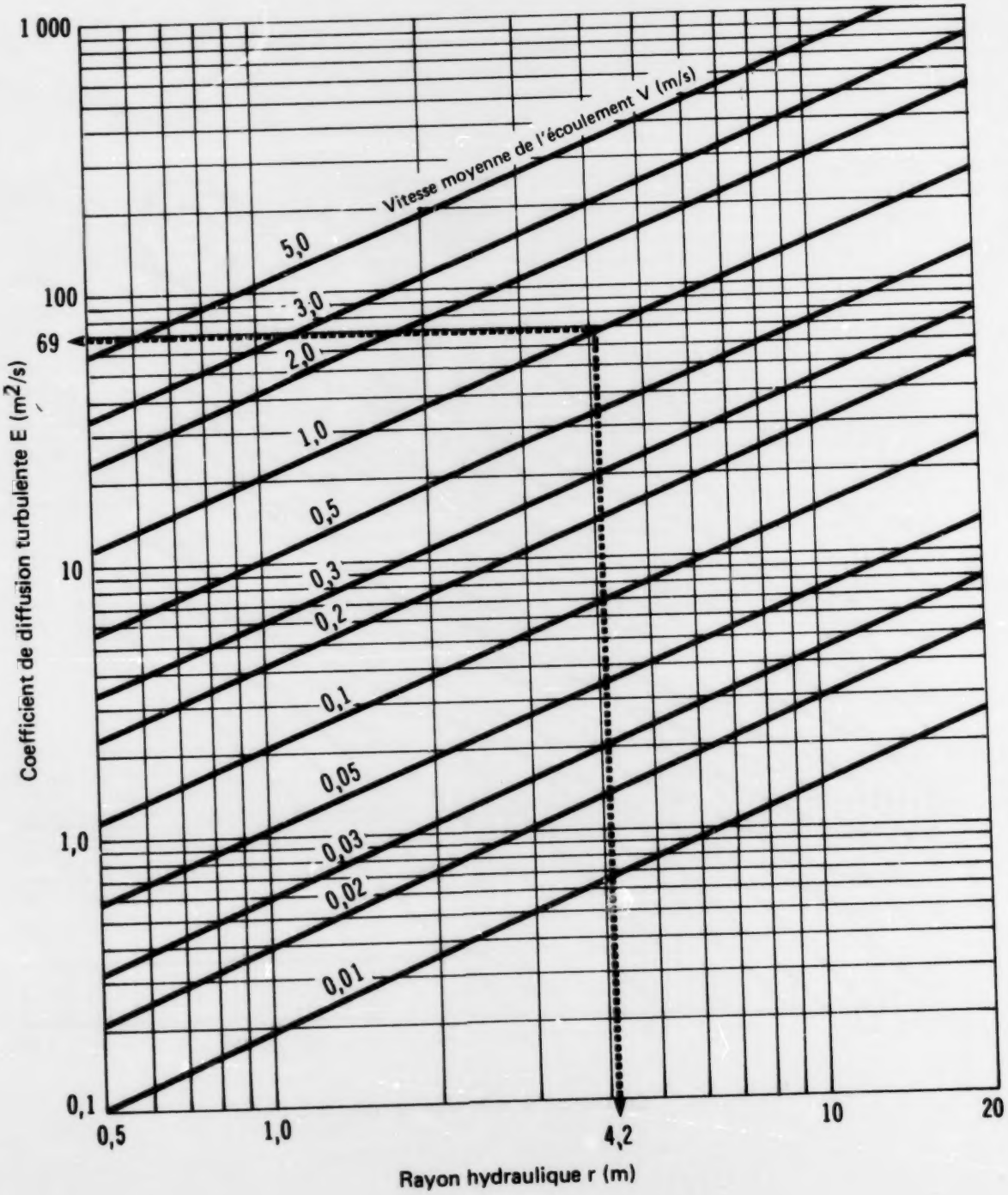


Figure 12

CHLORURE FERRIQUE

ALPHA EN FONCTION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION TURBULENTE

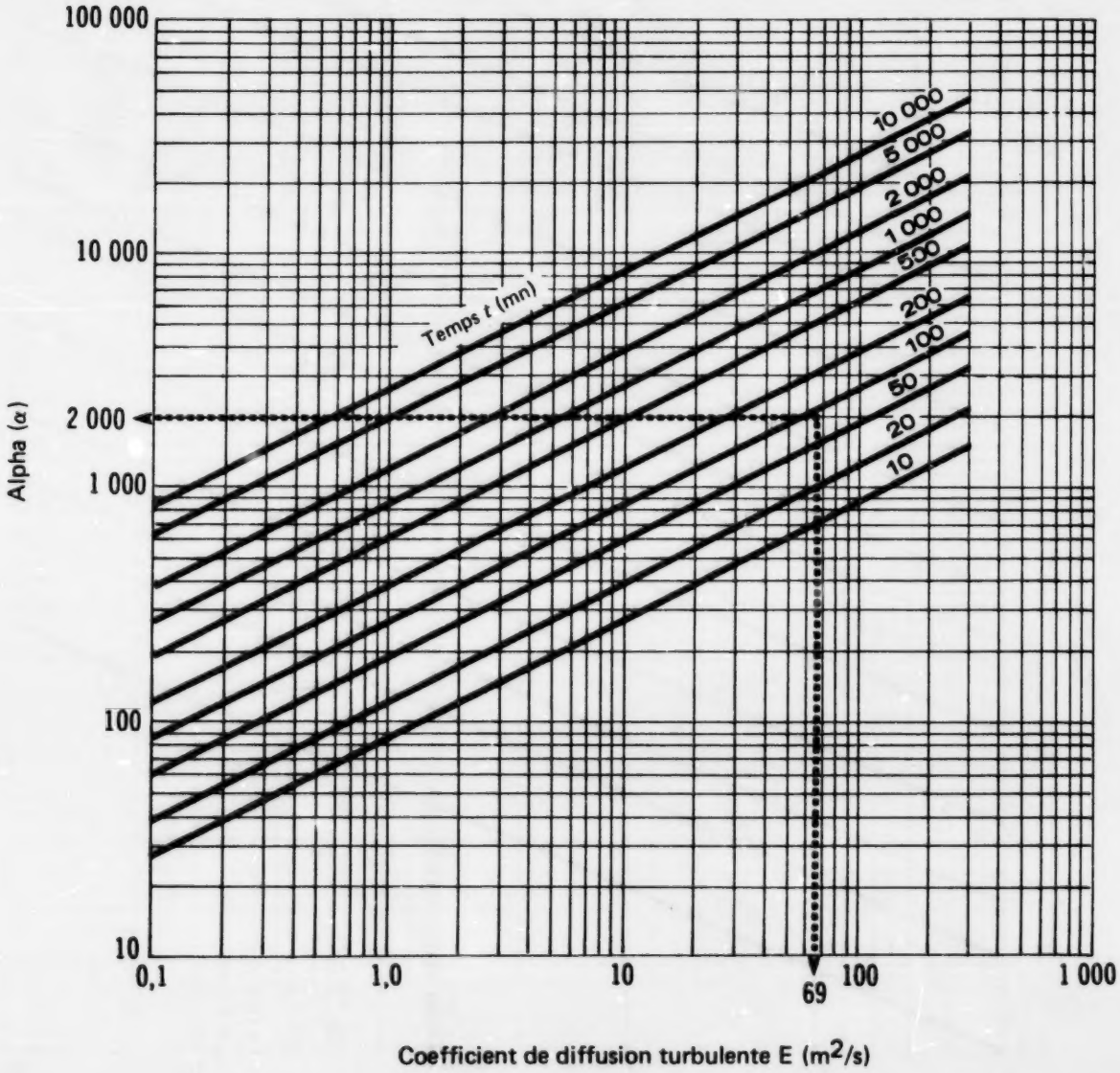


Figure 13

CHLORURE FERRIQUE — DELTA EN FONCTION DE ALPHA

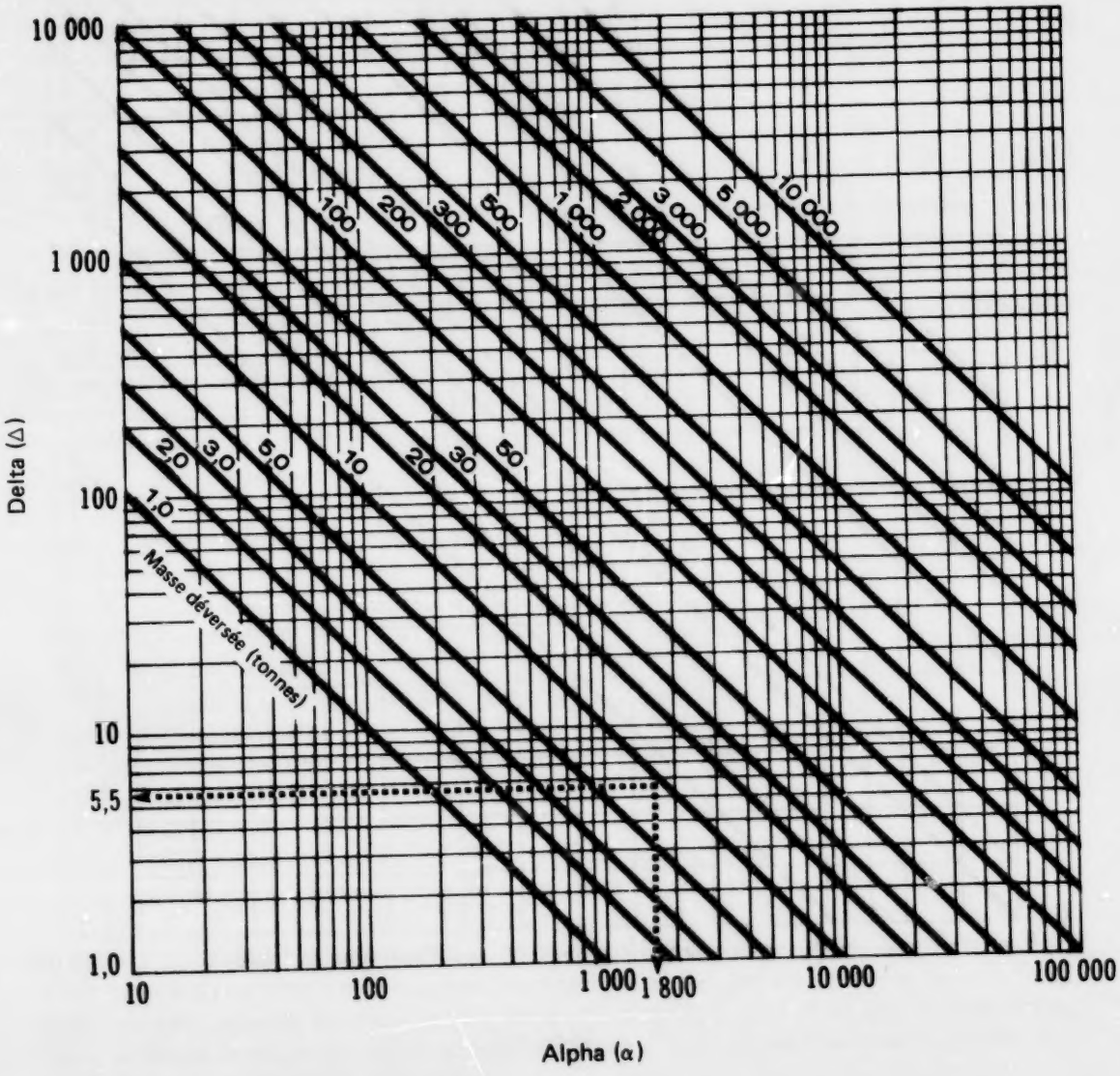
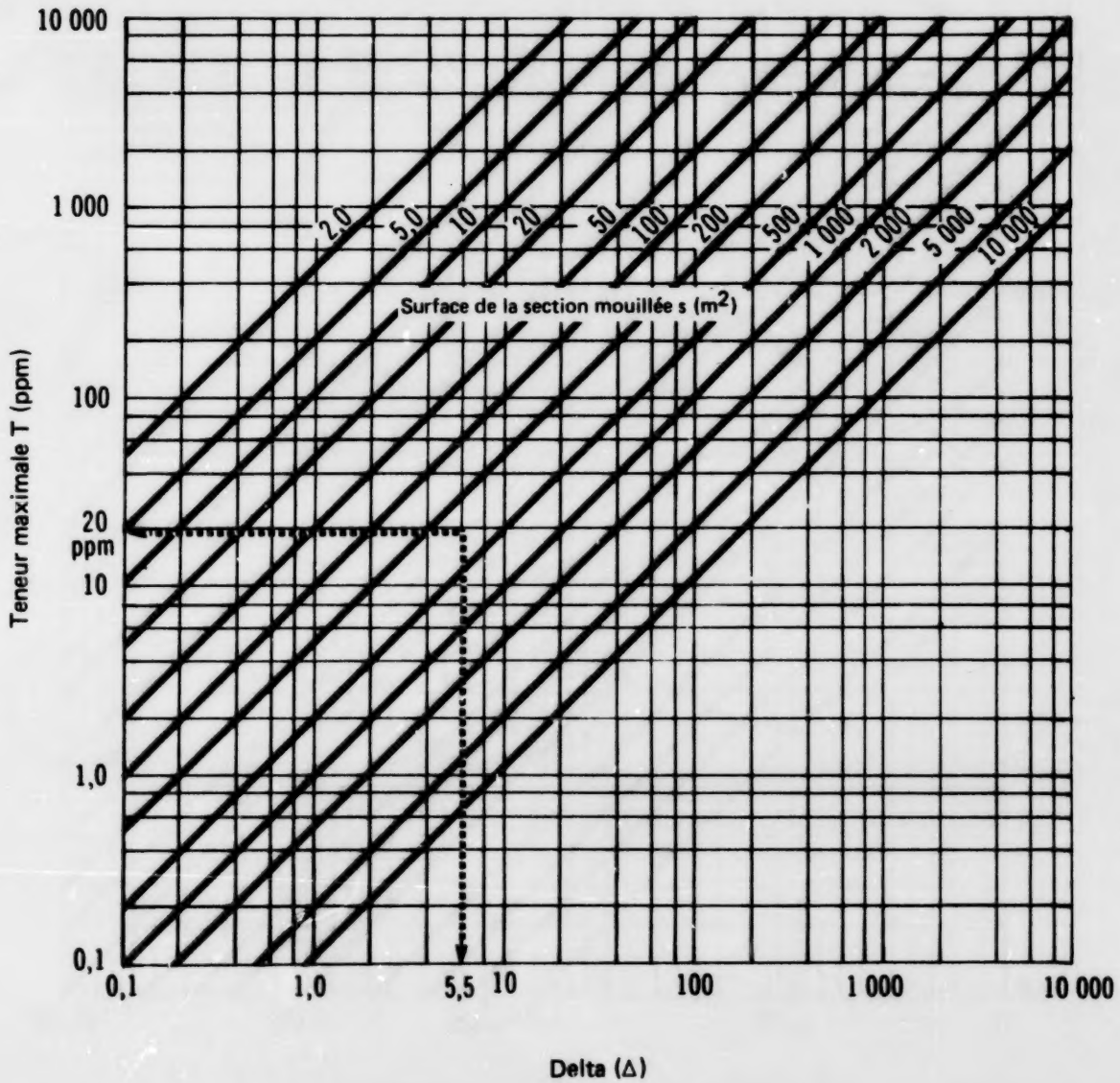


Figure 14

CHLORURE FERRIQUE — TENEUR MAXIMALE EN FONCTION DE DELTA



5.4.2.2 Diffusion dans les étendues d'eau calme ou les lacs (au repos)

Figure 15. Volume d'eau en fonction du rayon. – L'étendue d'eau calme (ni vent, ni courant) touchée par le déversement d'un liquide miscible (dans l'eau), de densité équivalente à celle de l'eau, est représentée par un cylindre théorique de rayon r et de longueur h égale à la hauteur d'eau à l'endroit où le déversement se produit. Le volume d'eau peut être obtenu à l'aide de la figure 15. Le rayon r équivaut à la distance x entre le lieu du déversement et le point où la teneur est mesurée.

Figure 16. Teneur moyenne en fonction du volume d'eau. – Pour un volume d'eau connu du cylindre théorique, le nomogramme permet d'établir une teneur moyenne en polluant selon la masse du liquide déversé. Il est pris pour acquis que la diffusion du polluant est uniforme dans le cylindre. En pratique, dans le cas de substances dont la densité relative est supérieure ou inférieure à celle de l'eau, la teneur réelle près du fond sera plus forte ou plus faible.

5.4.3 Exemples de calcul

5.4.3.1 Teneur en polluant dans une rivière non soumise aux marées. – Vingt tonnes d'une solution de chlorure ferrique à 45 p. 100 ont été déversées dans une rivière. La hauteur d'eau h est de 5 m, et la largeur L, de 50 m. La vitesse moyenne de l'écoulement est évaluée à 1 m/s. Quelle est la teneur maximale prévisible en un point situé à 5 km en aval, près d'une prise d'eau?

Étape 1 Déterminer les paramètres.
L = 50 m; h = 5 m; V = 1 m/s; x = 5000 m;
m = 20 tonnes d'une solution à 45 p. 100 = 9 tonnes de chlorure ferrique.

Étape 2 Déterminer le temps requis pour atteindre le point qui nous intéresse.
Comme x = 5000 m et V = 1 m/s, t = 83 mn (figure 9).

Étape 3 Déterminer le rayon hydraulique.
Comme L = 50 m et h = 5 m, r = 4,2 m (figure 10).

Étape 4 Déterminer le coefficient de diffusion turbulente.
Comme r = 4,2 m et V = 1 m/s, E = 69 m^2/s (figure 11).

Étape 5 Déterminer alpha.
Comme E = 69 m^2/s et t = 83 mn, α = 1800 (figure 12).

Étape 6 Déterminer delta.
Comme α = 1800 et m = 9 tonnes, Δ = 5,5 (figure 13).

Étape 7 Calculer la surface de la section mouillée.
s = L x h = 50 x 5 = 250 m^2.

Étape 8 Déterminer la teneur maximale au point qui nous intéresse.
Comme Δ = 5,5 et s = 250 m^2, T = 20 ppm (figure 14).

5.4.3.2 Teneur en polluant dans les étendues d'eau calme ou les lacs (au repos). – Vingt tonnes d'une solution de chlorure ferrique à 45 p. 100 ont été déversées dans un lac. Le point qui nous intéresse se trouve le long de la rive, à environ 1000 m du lieu du déversement. Entre ce lieu et le point qui nous intéresse, la hauteur d'eau moyenne est de 5 m. Quelle est la teneur moyenne prévisible en ce point?

Étape 1 Déterminer les paramètres.
h = 5 m; r = 1000 m; m = 9 tonnes (l'équivalent de la solution à 45 p. 100 x 20 t).

Figure 15

CHLORURE FERRIQUE

VOLUME D'EAU EN FONCTION DU RAYON HYDRAULIQUE

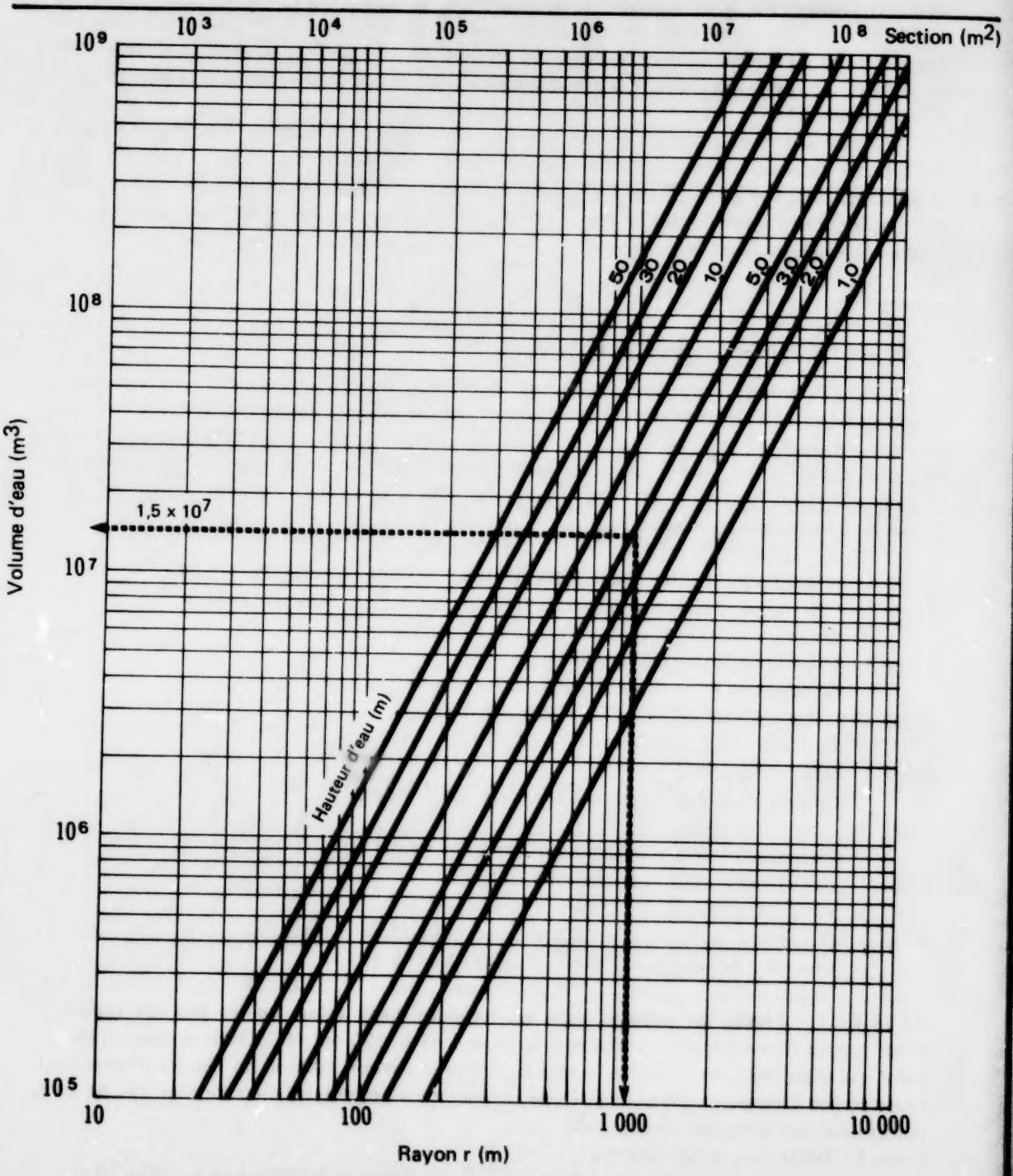


Figure 16

CHLORURE FERRIQUE — TENEUR MOYENNE EN FONCTION DU VOLUME D'EAU

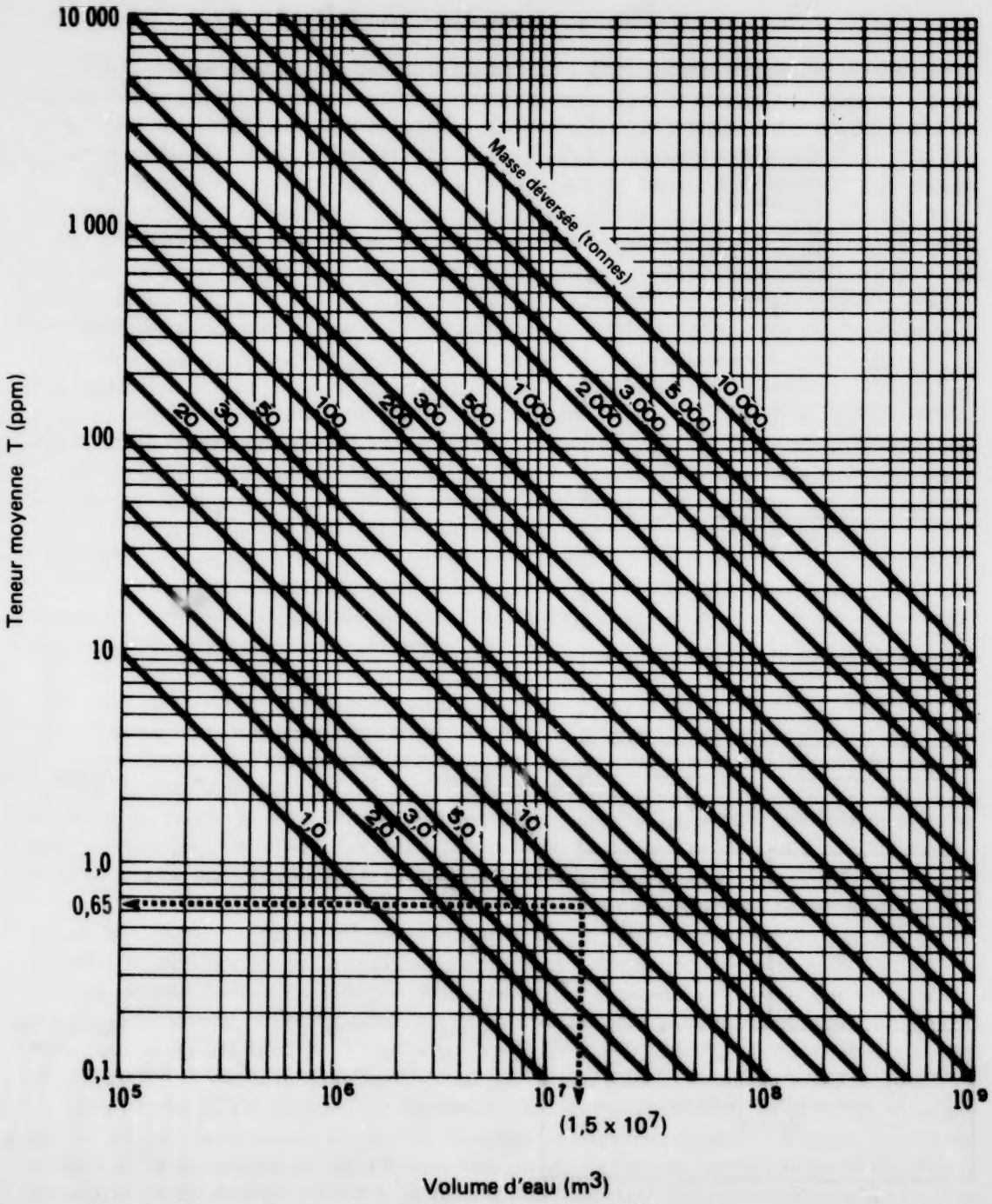
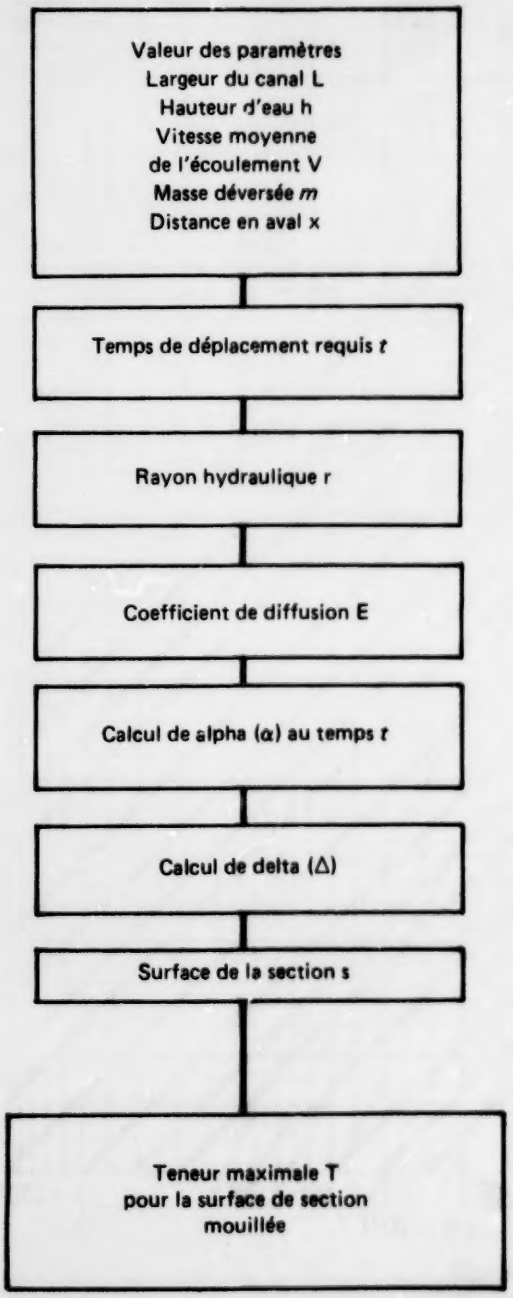


Figure 17

CHLORURE FERRIQUE

ÉTAPES À SUIVRE POUR CALCULER LA TENEUR EN POLLUANT DANS UNE RIVIÈRE NON SOUMISE AUX MARÉES



Étape 1	Par observation ou évaluation	
	L =	m
	h =	m
	V =	m/s
	m =	tonnes
	x =	m
Étape 2	*t* =	mn (fig. 9)
Étape 3	r =	m (fig. 10)
Étape 4	E =	m^2/s (fig. 11)
Étape 5	α =	(fig. 12)
Étape 6	Δ =	(fig. 13)
Étape 7	s = L x h =	m^2
Étape 8	T =	ppm (fig. 14)

Étape 2 Déterminer le volume d'eau assurant la diffusion.
Comme r = 1000 m et h = 5 m, vol. = 1,5 x 10^7 m^3 environ (figure 15).

Étape 3 Déterminer la teneur moyenne.
Comme vol. = 1,5 x 10^7 m^3 et m = 9 tonnes, T = 0,65 ppm (figure 16).

5.5 Comportement dans le sous-sol: pénétration dans le sol

5.5.1 Mécanismes. – Les principes du transport des polluants dans le sol et leur application à la migration du chlorure ferrique sont présentés dans le *Manuel d'introduction* de la collection Enviroguide. Seuls, certains aspects du déversement du chlorure ferrique sur le sol et de sa migration dans le sol sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

Le chlorure ferrique est transporté à l'état solide ou en solution dont la teneur peut atteindre 46 p. 100 en poids. Comme les solutions de chlorure ferrique et l'eau sont miscibles, lorsqu'il se produit un déversement, les solutions s'infiltreront dans le sol. Toutefois, une solution dont la teneur atteint 46 p. 100 a une viscosité élevée, et sa vitesse de migration dans le sol sera très lente.

Si le sol est humide au moment du déversement, soit à la suite d'une précipitation, soit qu'on ait utilisé de l'eau pour nettoyer l'aire du déversement, il y aura dilution du produit et une infiltration plus importante. Par contre, si le sol est saturé en eau au moment où se produit le déversement, comme cela peut être le cas à la suite d'une précipitation, le produit déversé ruissellera ou formera une mare.

Si du chlorure ferrique à l'état solide est déversé accidentellement sur le sol, il ne présente pas une source importante de pollution des eaux souterraines, à la condition que le sol soit sec et que le nettoyage de l'aire polluée par le déversement soit terminé avant qu'il ne pleuve.

On a supposé, dans le cas présent, que les sols avaient une teneur en eau égale à leur capacité au champ (ou capacité normale d'humidité). Le sol recèle alors très peu d'eau interstitielle susceptible de diluer le produit au cours de sa migration ou de freiner son mouvement descendant, situation qui correspond au pire scénario.

Au cours de la migration du chlorure ferrique dans le sol, il y a interaction de l'ion ferrique et des matériaux constitutifs du sol et acidification de ce dernier par hydrolyse. Il a été démontré par des essais que l'ion ferrique pouvait contribuer à remplacer l'acidité de certains sols. Des essais sur l'action de l'ion ferrique sur le sol ont été effectués avec des chlorures neutres, et l'acidité de remplacement produite a été titrée par potentiométrie. On a également trouvé au cours de ces essais que l'ion ferrique échangeable est instable parce qu'il tend à hydrolyser et que le proton produit dissout les cations réticulaires. On a de plus démontré que l'hydrolyse seule n'entraîne pas normalement la formation d'oxyde ferrique aqueux.

Du fer soluble qui migre dans un sol peut précipiter par adsorption sur un matériau argileux ou par une augmentation du pH (possiblement à de plus grandes profondeurs), ce qui réduit la charge positive acquise par les particules colloïdales. Lorsque le pH se situe entre 5 et 8, l'ion ferrique ne peut rester en solution et forme un complexe ou une suspension. Par exemple, les formes de fer trouvées à l'état naturel dans les eaux souterraines au cours d'une étude comptaient entre autres $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$, $[Fe(H_2O)_5OH]^{2+}$, $[Fe(H_2O)_5OH]^{+}$, $[Fe(H_2O)_4(OH)_2]^{+}$ et $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$. L'oxyde ferrique aqueux n'est présent que dans les eaux dont le pH dépasse 7.

Les oxydes de fer (III) ont une faible solubilité et, par conséquent, ils se déplacent moins dans le sol que les oxydes de fer (II). La réduction de l'ion ferrique peut s'effectuer à partir du produit de la décomposition de matières organiques. Cependant, la formation de complexes organiques ou de chélates constitue un facteur plus important dans la mobilisation du fer. Par

exemple, l'humus provenant de la décomposition des feuilles et des débris organiques de la forêt est un agent actif de la mobilisation du fer. Le fer complexé par des acides fulviques est mobile, tandis que le fer complexé par des acides humiques est insoluble (Hesse, 1972). La migration de l'ion ferrique à la suite d'un déversement de chlorure ferrique est un phénomène compliqué, et les auteurs n'ont pas jugé bon de la modéliser. Seule une fraction du fer conservera une forme mobile et migrera vers la nappe phréatique.

Lorsque le polluant atteint la nappe phréatique, il continue sa migration dans la direction de l'écoulement de l'eau de la nappe. Il formera une poche de pollution dont la teneur sera en quelque sorte diminuée par les phénomènes de diffusion et de dispersion (voir la figure 18).

5.5.2 Migration du chlorure ferrique dans la zone non saturée. – Les équations et les postulats, utilisés pour déterminer la migration du polluant dans la zone non saturée jusqu'à la nappe phréatique, sont présentés dans le *Manuel d'introduction* de la collection Enviroguide. Les vitesses de migration sont établies à partir de la loi de Darcy, en posant comme hypothèse la formation d'une colonne saturée en solution polluée, par suite d'un écoulement en bloc.

5.5.3 Coefficient de perméabilité du nitrate d'ammonium en sol saturé. – Le coefficient de perméabilité, qui correspond au coefficient k de la loi de Darcy, est un paramètre mesurant la perméabilité d'un milieu continu, en m/s. Il est défini par:

$$k = \frac{(\rho g)k}{\mu}$$

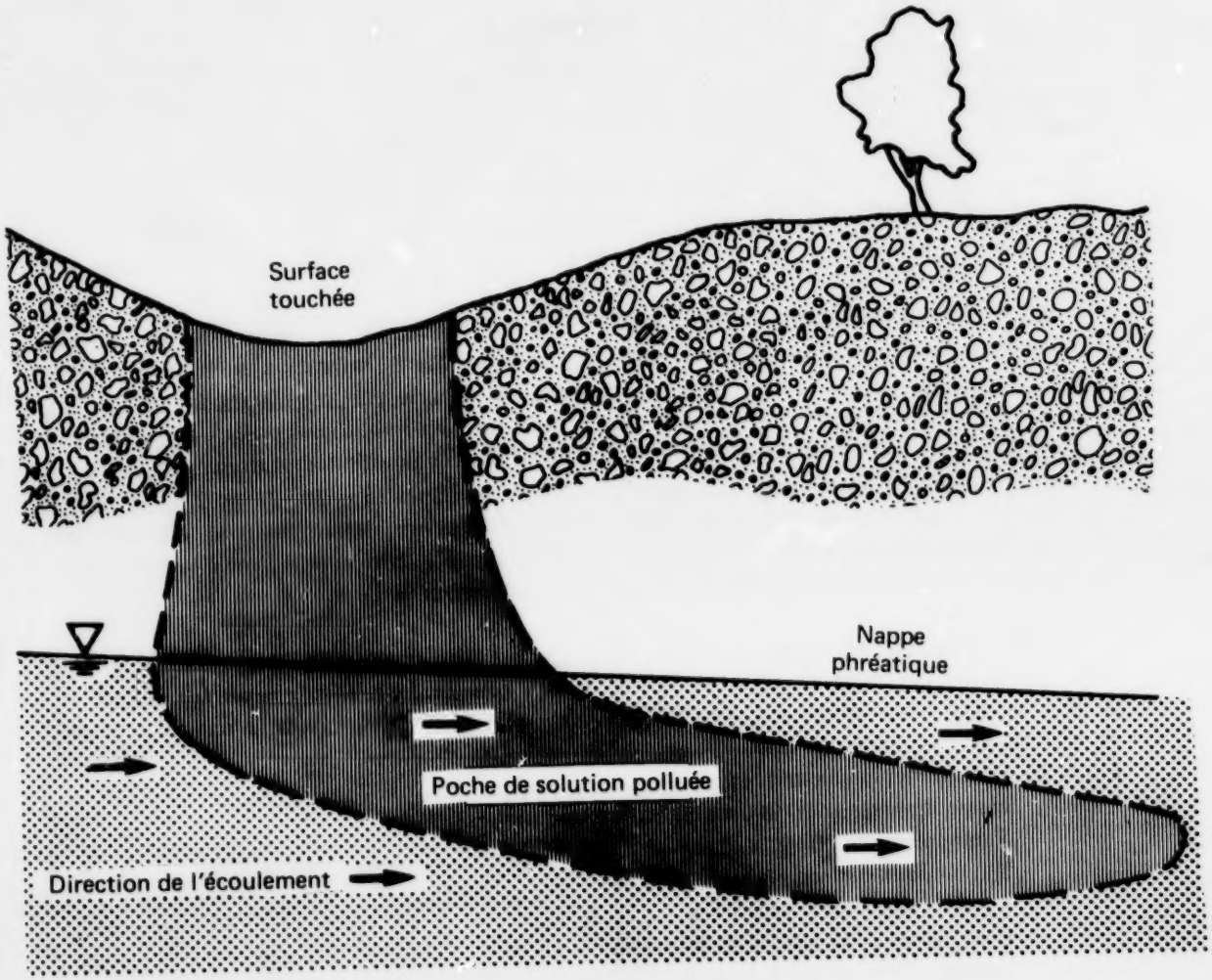
où: k = perméabilité intrinsèque du sol (m^2)
ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3)
μ = viscosité absolue du fluide (Pa · s)
g = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s^2

Les liquides présents sont des solutions de chlorure ferrique à 46 p. 100 et 14 p. 100 en poids et l'eau. Les données relatives à l'eau, dans le tableau qui suit, représentent le point extrême de dilution du chlorure ferrique.

	Chlorure ferrique				
	46 p. 100 au poids		14 p. 100 au poids		Eau
Propriété	20 °C	4 °C	20 °C	4 °C	20 °C
Masse volumique ρ (kg/m^3)	1,485	1,500	1,130	1,140	998
Viscosité absolue μ (Pa · s)	$15,4 \times 10^{-3}$	$10,6 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-3}$	$1,88 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Coefficient de perméabilité k (m/s)	$(0,1 \times 10^{7})k$	$(0,14 \times 10^{7})k$	$(0,57 \times 10^{7})k$	$(0,6 \times 10^{7})k$	$(0,98 \times 10^{7})k$

Figure 18

CHLORURE FERRIQUE — MIGRATION DANS LE SOL



Sol: sable grossier non saturé
Porosité = 0,35, Perméabilité intrinsèque = 10^{-9} m^2, Capacité au champ = 0,075

5.5.4 Types de sol. – Le *Manuel d'introduction* de la collection Enviroguide décrit les trois types de sol retenus pour les besoins de la présente section. Le tableau ci-dessous indique les propriétés qui nous intéressent.

Propriété	Types de sol		
	Sable grossier	Sable limoneux	Till argileux
Porosité (m^3/m^3)	0,35	0,45	0,55
Perméabilité intrinsèque (m^2)	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}
Capacité au champ (m^3/m^3)	0,075	0,3	0,45

5.5.5 Nomogrammes de migration. – Un nomogramme de migration du nitrate d'ammonium dans la zone non saturée (au-dessus de la surface de saturation) a été préparé pour chacun des trois types de sol choisis. La profondeur atteinte par le polluant est donnée en fonction du temps de migration. Vu les méthodes utilisées et les hypothèses posées, la profondeur atteinte par le polluant doit être considérée comme maximale pour le temps donné. La figure 19 indique la marche à suivre dans l'utilisation des nomogrammes (fig. 20, 21 et 22). La droite représentant la profondeur atteinte par l'eau correspond à la profondeur maximale d'infiltration de l'eau à une température de 20 °C, pour un temps donné. Elle correspond donc à la profondeur maximale de migration du polluant dilué à l'extrême au contact de l'eau.

5.5.6 Exemple de calcul. – Vingt tonnes de chlorure ferrique en solution à 46 p. 100 en poids ont été déversées sur un sol constitué de sable grossier. Le rayon de la surface polluée est de 8,6 m. La température est de 20 °C. Calculer la profondeur atteinte par le polluant, 80 minutes après le déversement.

Étape 1 Déterminer la valeur des paramètres.
Masse déversée = 20 000 kg (20 tonnes métriques)
Température = 20 °C
Rayon de la surface polluée = 8,6 m
Type de sol = sable grossier
Profondeur de la surface de saturation = 13 m
Temps écoulé depuis le moment du déversement = 80 mn

Étape 2 Calculer la surface de sol pollué.
Surface = πr^2 = 232 m^2

Étape 3 Évaluer la profondeur atteinte par le polluant après 80 minutes.
Dans le cas du sable grossier, après 80 mn, la profondeur atteinte est de 4,6 m pour une solution à 46 p. 100. Le niveau hydrostatique n'a pas été atteint.

Figure 19

CHLORURE FERRIQUE — **PLAN D'UTILISATION DES NOMOGRAMMES**

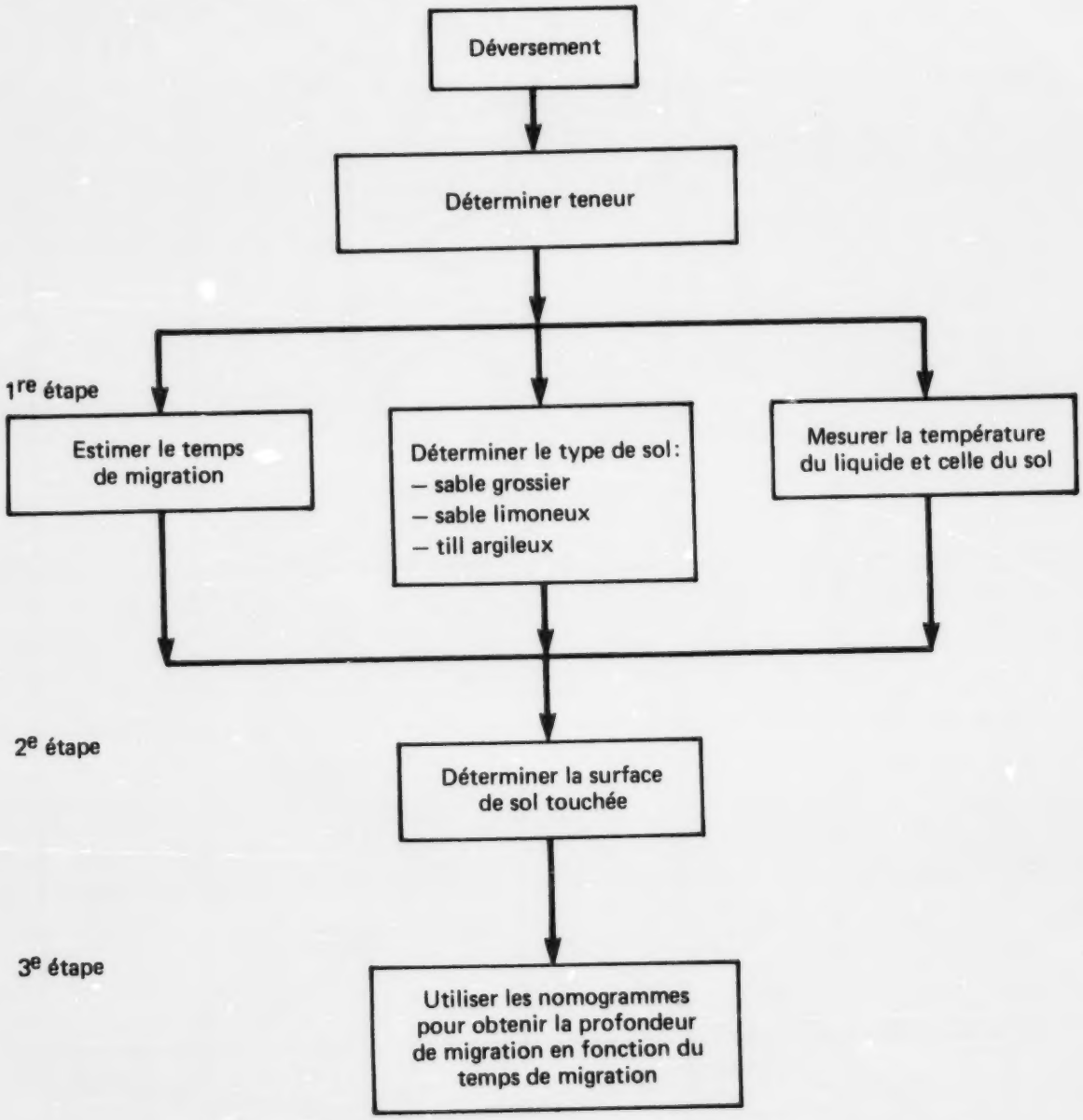


Figure 20

CHLORURE FERRIQUE — MIGRATION DANS DU SABLE GROSSIER

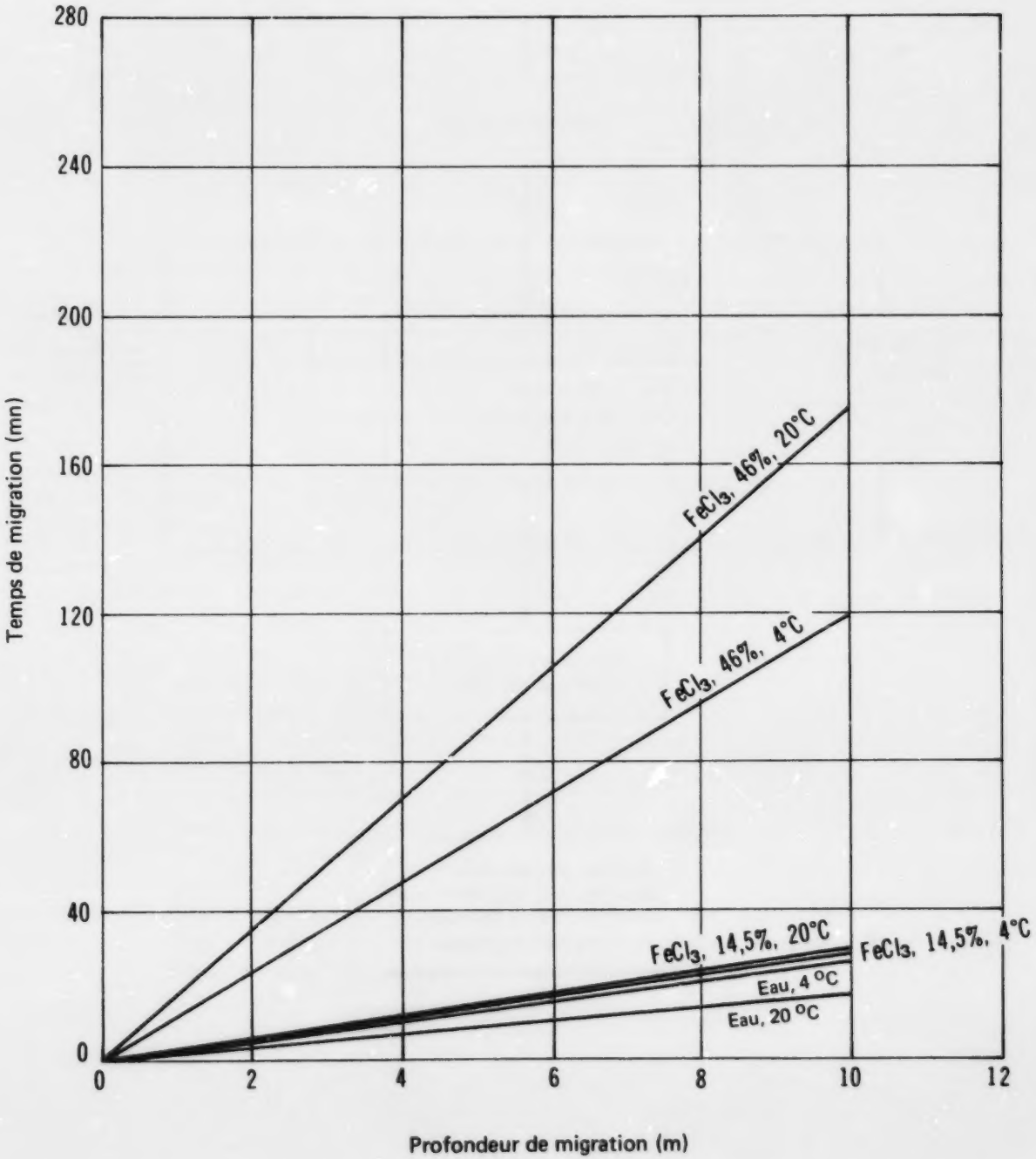


Figure 21

CHLORURE FERRIQUE

MIGRATION DANS DU SABLE LIMONEUX

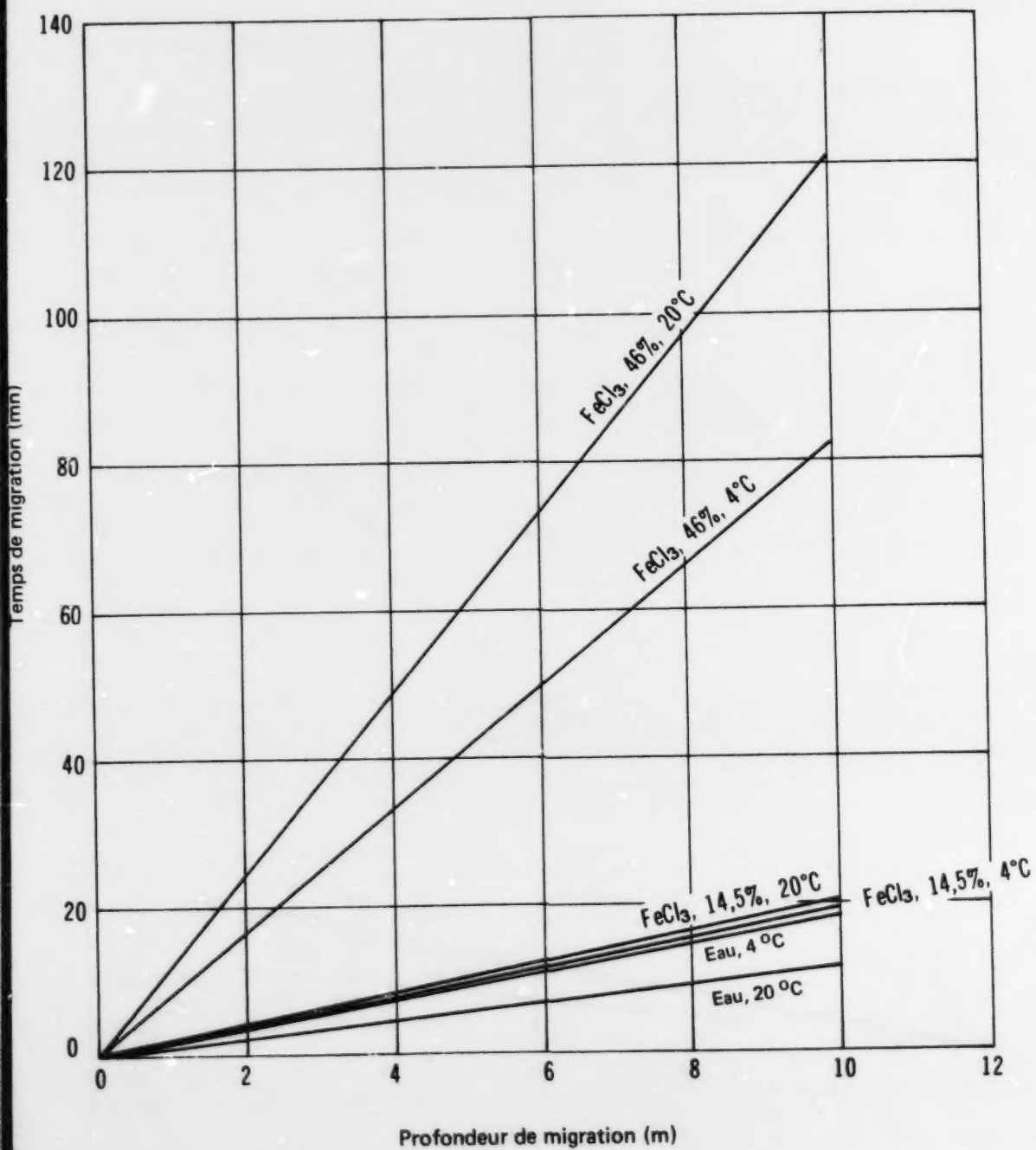
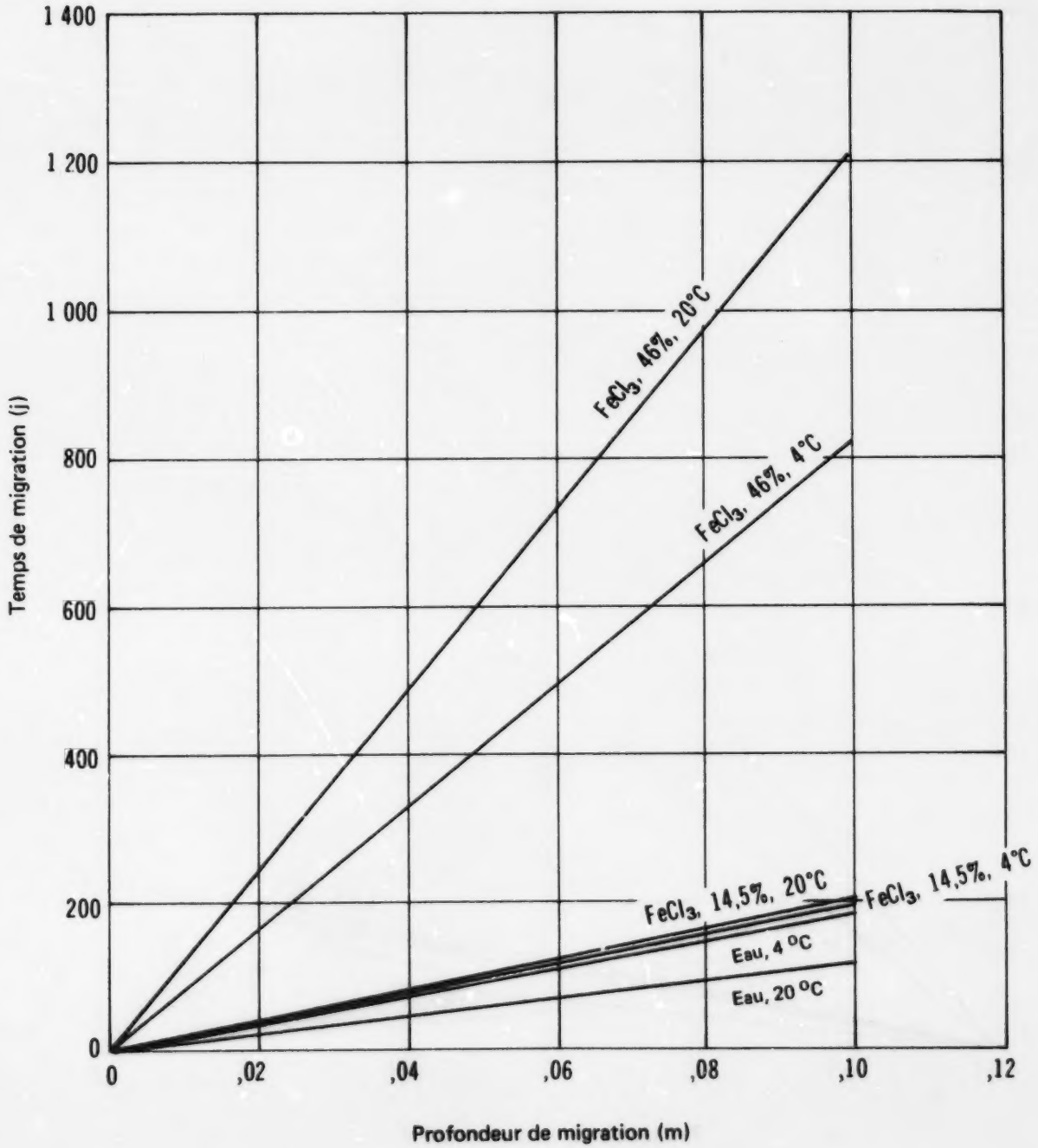


Figure 22

CHLORURE FERRIQUE — MIGRATION DANS DU TILL ARGILEUX



6 PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

6.1 Limites maximales permises

6.1.1 Qualité de l'eau

6.1.1.1 Situation au Canada. – Au Canada, la teneur maximale admissible en fer de l'eau a été fixée à 0,3 mg/l. L'objectif poursuivi est de moins de 0,5 mg/l pour des raisons d'esthétique (Guidelines/Canadian/Water, 1978; Water Management Goals, 1978).

6.1.1.2 Situation ailleurs dans le monde. – Aux États-Unis, on a proposé de fixer pour l'eau potable et l'eau d'abreuvement une teneur limite en fer de 0,3 ppm et une teneur limite plus élevée pour le chlorure, une teneur en fer de 350 ppm pour l'eau destinée à l'irrigation et une teneur de 1500 ppm pour celle destinée au bétail (EPA 009, 1972).

6.1.2 Qualité de l'air. – L'Ontario E.P.Act de 1971 ne fixe aucune norme pour le chlorure ferrique mais établit pour l'oxyde ferrique une limite de 75 $\mu g/m^3$.

6.2 Toxicité pour les espèces aquatiques

6.2.1 Évaluation de la toxicité aux États-Unis. – Aucune TLm96 (tolérance moyenne pour 96 heures) n'a été établie pour le chlorure ferrique (RTECS, 1979).

6.2.2 Mesures de la toxicité

Toxicité mesurée en eau douce

Teneur en chlorure ferrique	Durée	Espèce	Résultat	Caractéristiques du milieu d'essai	Référence
A. – Poissons					
0,6 mg/l	Inconnue	Poisson doré	Nocif	Eau du robinet	OHM-TADS, 1981
1 mg/l	240 h	Épinoche à trois épines	Sans effet	Eau du robinet	OHM-TADS, 1981
1,2 mg/l	144 h	Épinoche à trois épines	Nocif	Eau du robinet	CHRIS, 1978
3 mg/l [en FeO (OH)]	Inconnue	Saumon Coho	Aucun effet sur la ponte des oeufs, le développement de l'embryon ou sur la survie	Conditions statiques	EPA-600/J-79-073, 1979
4 mg/l (en Fe)	24 h à 96 h	Larves de bar rayé	TL50	Conditions statiques	Hughes, 1973
4,35 mg/l	72 h	Poisson doré	Nocif	Eau du robinet	WQC, 1963; OHM-TADS, 1981
5 mg/l à 10 mg/l	96 h	Poisson doré	Létal	Test biologique en laboratoire	WQCDB-5, 1973

Teneur en chlorure ferrique	Durée	Espèce	Résultat	Caractéristiques du milieu d'essai	Référence
6 mg/l (en Fe)	24 h à 96 h	Alevins de bar rayé	TL50	Conditions statiques	Hughes, 1973
6 mg/l (en Fe)	48 h à 96 h	Larves de bar rayé	TL100	Conditions statiques	OHM-TADS, 1981
8 mg/l (en Fe)	24 h	Larves de bar rayé	TL100	Conditions statiques	OHM-TADS, 1981
8 mg/l (en Fe)	24 h à 96 h	Alevins de bar rayé	TL100	Conditions statiques	
9 mg/l	20 h	Poisson doré	Nocif	Eau distillée	OHM-TADS, 1981
10 mg/l (en $FeCl_3$)	96 h	Poisson doré	Sans effet	Eau douce, pH de 5,0	Doudoroff, 1953
20 mg/l	144 h	Poisson doré	Nocif	Eau du robinet	WQC, 1963; OHM-TADS, 1981
74 mg/l	96 h	Gambusie	TLm	Eau trouble	WQC, 1963
100 mg/l (en $FeCl_3$)	80 mn	Poisson doré	Létal*	Eau douce, pH de 3,4	Doudoroff, 1953
100 mg/l (en $FeCl_3$)	1,5 h	Poisson doré	TLm	Eau douce, pH de 5,0	Doudoroff, 1953
100 mg/l (en $FeCl_3$)	96 h	Poisson doré	Sans effet	Eau dure, pH de 5,5	WQC, 1963; OHM-TADS, 1981; Doudoroff, 1953
270 mg/l	1,5 h	Méné	Sans effet		OHM-TADS, 1981
540 mg/l	1,5 h	Méné	TLm		WQC, 1963
2700 mg/l	1 h	Méné	TLm		OHM-TADS, 1981
5400 mg/l	1 h	Méné	TLm	Eau douce	WQC, 1963
0,0000166 normale	1200 mn	Carassin	Survie		WQC, 1971
0,284 normale	29 mn	Carassin	Survie		WQC, 1971
0,9 normale (en Fe)	Inconnue	Carpe	Toxique	pH de 5,5	QCW, 1976
1 à 2 normale (en Fe)	Inconnue	Brochet, truite	Létal		QCW, 1976
0,005 normale (en $FeCl_3$)	89,5 mn (187)**	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,01 normale (en $FeCl_3$)	86 mn (144)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,033 normale (en $FeCl_3$)	77 mn (111,5)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,05 normale (en $FeCl_3$)	68,5 mn	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927

* L'acide a un effet aussi rapidement fatal dans une eau dure à un pH de 3,5.

** Les chiffres entre parenthèses indiquent la teneur en $FeSO_4$ dans les mêmes conditions.

Teneur en chlorure ferrique	Durée	Espèce	Résultat	Caractéristiques du milieu d'essai	Référence
0,08 normale (en $FeCl_3$)	67 mn (79,5)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,10 normale (en $FeCl_3$)	54 mn (68)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,125 normale (en $FeCl_3$)	50 mn (63)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
0,16 normale (en $FeCl_3$)	47 mn (59)	Méné (*Leuciscus phoxinus*)	Survie		Carpenter, 1927
3×10^{-5} molaire (en $FeCl_3$)	50 h	*Orizias latipes*	Teneur la plus élevée tolérée		Doridoroff, 1953
1 ppm de $FeCl_3$ (en Fe)	10 j	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 5,0	Doridoroff, 1953
1,5 ppm de $FeCl_3$ (en Fe)	3 j	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 4,6	Doridoroff, 1953
2,0 ppm de $FeCl_3$ (en Fe)	2 j	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 4,4	Doridoroff, 1953
3,0 ppm de $FeCl_3$ (en Fe)	1 j	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 4,2	Doridoroff, 1953
7,0 ppm (en $FeCl_3$)	6 h	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 3,8	Doridoroff, 1953
20 ppm (en $FeCl_3$)	3 h	Épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus* Linnaeus)	Survie	pH de 3,4	Doridoroff, 1953
B. – Microorganismes					
15 mg/l (en $FeCl_3$)	100 h	Puce d'eau (jeunes)	TLm	Eau de référence normalisée et eau de lac	Dowden, 1965

Toutefois, le fer contenu dans les eaux d'irrigation n'est pas toxique pour les plantes, parce qu'il n'est pas assez soluble dans des sols aérés qui ont un pH favorable à la croissance des plantes (WQC, 1972). Le chlorure constitue le facteur limitatif. La teneur plafond, en ce qui a trait à une exposition chronique des végétaux, a été fixée à 1000 ppm (à l'état de chlorure) (OHM-TADS, 1981).

6.3.3 Toxicité pour les insectes

Teneur (mg/l)	Durée	Espèce	Résultat	Caractéristiques du milieu d'essai	Source
0,32 (en $FeCl_3$)	96 h	Éphémères	TLm	pH de 8,2, dureté de 48*	Warinck, 1969
16,0 (en $FeCl_3$)	7 j	Phryganes	50 p. 100 de survivants	pH de 8,1, dureté de 50*	Warinck, 1969
16,0 (en $FeCl_3$)	9 j	Perles	50 p. 100 de survivants	pH de 7,7, dureté de 48*	Warinck, 1969

* Oxygène dissous = 8,0 mg/l dans tous les cas.

6.4 Dégradation du polluant

Le chlorure ferrique ne se biodégrade pas. Dans les stations d'épuration des eaux, il contribue à l'augmentation du volume des boues. Il perturbe la digestion des boues d'égout à une teneur de 500 mg/l et inhibe totalement la digestion au-dessus de 1000 mg/l (Gosh, 1974). Une teneur supérieure à 100 mg/l en ion ferrique (Fe^{3+}) nuit à la capacité des microorganismes d'utiliser l'oxygène (PB-276724).

La gazéification au cours du traitement des boues n'a pas été affectée par une teneur de moins de 5 ppm de $FeCl_3$ mais a été grandement retardée lorsque la teneur en $FeCl_3$ a été augmentée à 20 ppm. Ceci a été attribué en partie à l'acidité produite par l'hydrolyse de l'ion ferrique. On a trouvé que le nombre de microorganismes dans les boues d'égout traitées avec 10 ppm de $FeCl_3$ avait diminué. Par contre, le débit et la quantité d'oxygène absorbé par les boues d'égout ne dépendait pas de la quantité de composés de fer présents. On a également trouvé que le traitement des boues avec du $FeCl_3$ augmentait la vitesse de la digestion mais diminuait le volume de gaz produit (Rudolfs, 1950).

6.5 Devenir et effets à long terme

Le chlorure ferrique forme finalement une solution acide, précipitant l'oxyde hydreux gélatineux rouge brunâtre Fe(OH) lors d'une dilution (Cotton, 1972; Bailar, 1973). Les phosphates sont aussi effectivement enlevés à l'état de sels de fer insolubles (Campbell, 1982). Des boues trop riches en fer au fond d'un réservoir peuvent libérer continuellement de petites quantités de fer, qui peuvent avoir un effet toxique s'il y a exposition chronique (EPA-440/9-75-009). La végétation aquatique peut bioconcentrer le fer par un facteur de 50 000, les invertébrés marins, par un facteur de 20 000, les plantes dulçaquicoles, par un facteur de 5000, les invertébrés, par un facteur de 3200, et les poissons, par un facteur de 300 (Chapman, 1968).

Teneur en chlorure ferrique	Durée	Espèce	Résultat	Caractéristiques du milieu d'essai	Référence
< 18 mg/l	64 h	Puce d'eau	Limite d'immobilisation		WQC, 1963
21 mg/l (en $FeCl_3$)	50 h	Puce d'eau	TLm	Eau de référence normalisée et eau de lac	Dowden, 1965
36 mg/l (en $FeCl_3$)	25 h	Puce d'eau	TLm	Eau de référence normalisée et eau de lac	Dowden, 1965
116 mg/l	Inconnue	Cyclope	Teneur seuil	Lac Érié, 20 °C	WQC, 1963
130 mg/l	Théorique-ment sans limite	Puce d'eau	Limite d'immobilisation	Eau du lac Érié centrifugée	WQC, 1971
C. – Invertébrés					
200 mg/l	24 h	Escargots (*Biomorpholaria Alexandrina* et *Bulinus truncatus*)	Létal	26 °C	Gohar, 1961

6.2.3 Études en milieu aquatique. – On a trouvé que les sels de fer sont très dommageables immédiatement après leur dissolution dans l'eau. Il y a blocage des branchies (processus réversible) ainsi qu'absorption dans le système digestif et précipitation du fer dans l'épithélium et les tubules rénaux (WQCDB-5, 1973). La toxicité semble être fonction de plusieurs autres facteurs: dureté de l'eau, pH, température et effet tampon, mais surtout de l'acidité de l'eau (EPA-440/9-75-009).

Le chlorure ferrique a un effet toxique sur l'épinoche à trois épines similaire à celui des solutions d'acide hydrochlorique de même pH. Ceci indique que le fer trivalent possède une faible toxicité. Par contre, le fer divalent peut entraîner plus d'inconvénients parce qu'il est un agent réducteur, et s'il est oxydé, il peut former de l'oxyde ferrique qui précipite en une boue rouge brunâtre. On a également constaté que l'ion ferrique a un effet toxique semblable sur les anguilles et le poisson *Orizias latipes* à celui de l'étain, l'aluminium et le nickel, un effet toxique supérieur à celui de l'ion ferreux et un effet toxique inférieur à celui du mercure, du cuivre, du zinc et du cadmium (Jones, 1972).

6.3 Toxicité pour d'autres organismes

6.3.1 Toxicité pour le bétail. – En ce qui a trait à la toxicité aiguë, une teneur plafond de 500 mg/kg à 999 mg/kg a été fixée pour le chlorure ferrique à la suite d'essais de DL50 sur des mammifères (WQCDB-2, 1971). Une teneur plafond de 1500 ppm (seuil du chlorure) a été établie pour une exposition chronique des animaux (OHM-TADS, 1981).

6.3.2 Toxicité pour les végétaux. – Le fer assimilable par les végétaux existe sous formes d'ion ferreux (Fe^{2+}) et d'ion complexe $[Fe(OH)_n]^{(3-n)+}$. L'assimilation par les plantes du fer, qui possède plus d'une valence, dépend de l'oxydation du sol. On a constaté une plus grande toxicité du fer dans des sols inondés, condition qui procure un plus grand apport de fer pour la nutrition végétale (Hesse, 1972).

7 PROTECTION DE LA SANTÉ

Les publications spécialisées font peu état des effets toxiques, chez l'homme et l'animal, d'une exposition au chlorure ferrique. On parle surtout de ses effets irritants pour les yeux et la peau et des conséquences de son ingestion. Jusqu'à maintenant, il n'existe aucune information sur les effets possibles du chlorure ferrique sur la reproduction, sur son pouvoir mutagène ou sur son pouvoir cancérogène, et très peu d'information sur les effets d'une exposition chronique à ce produit.

Le chlorure ferrique est répertorié dans l'inventaire des substances toxiques de juillet 1979 de l'EPA (TSCA). Les données toxicologiques qui suivent sont extraites de sources dignes de confiance et sont représentatives des valeurs publiées dans différents rapports.

7.1 Normes d'exposition recommandées

Les normes d'exposition au chlorure ferrique sont basées sur ses propriétés irritantes. Les directives des provinces canadiennes ressemblent en général à celles qui sont élaborées par l'ACGIH aux États-Unis.

Directive (durée de l'exposition)	Origine	Teneur recommandée	Référence
		Teneur pondérée en fonction du temps	
TLV® de 8 h	ACGIH	1 mg/m^3 (sels de fer solubles, comme Fe)	TLV, 1983
		Teneur admissible pour des expositions de courte durée	
STEL de 15 mn	ACGIH	2 mg/m^3 (sels de fer solubles, comme Fe)	TLV, 1983

7.2 Données sur les propriétés irritantes

7.2.1 Contact avec la peau

Dose (teneur et durée)	Effets	Référence
CHEZ L'HOMME		
–	Le chlorure ferrique à l'état solide brûle la peau	CHRIS, 1978
Teneur équivalente à 42 °Bé	Un contact prolongé du chlorure ferrique en solution tache la peau et peut causer une dermatite semblable à celle causée par les acides faibles	GE, 1979
Contact direct	La forme anhydre constitue un irritant pour la peau et les tissus	Hawley, 1977; Merck, 1983

7.2.2 Contact avec les yeux

Dose (teneur et durée)	Effets	Référence
CHEZ L'HOMME –	La poussière de chlorure ferrique irrite les yeux. À l'état solide, il peut brûler les yeux	CHRIS, 1978

7.3 Seuil de perception des caractères organoleptiques

7.3.1 Odeur. – Le chlorure ferrique en solution dans l'eau (plus spécifiquement, l'acide hydrochlorique) a une odeur légèrement acide (GE, 1979).

7.3.2 Goût. – Le chlorure ferrique goûte le fer (AAR, 1981).

Paramètre	Milieu	Teneur	Référence
Seuil de goût moyen	Eau distillée	3,4 ppm	QCW, 1976
Goût métallique facilement décelable	Eau de source	1,8 mg/l	QCW, 1976

7.4 Études à long terme

7.4.1 Inhalation. – Il existe peu de données sur les effets de l'inhalation des composés de fer et aucune information sur les répercussions de l'inhalation du chlorure ferrique. Seul l'oxyde ferrique semble avoir des effets à très long terme: une inhalation chronique d'oxyde ferrique produit une sidérose (pneumoconiose minérale de surcharge, liée à l'inhalation de poussières d'oxyde de fer) (Patty, 1981; Kirk-Othmer, 1981). Il est improbable que le déversement de chlorure ferrique anhydre puisse engendrer des conditions d'inhalation chronique de particules atmosphériques. La nature hygroscopique du produit le fait s'hydrater rapidement et s'agglutiner. Une exposition de courte durée à une grande quantité de chlorure ferrique dans l'air, anhydre ou hydraté, ferait probablement apparaître des symptômes similaires à ceux prévus dans le cas d'un aérosol d'acide hydrochlorique, à cause de son hydrolyse lorsqu'il est en solution. Étant donné le peu d'informations sur la toxicité du chlorure ferrique, il a été décidé d'inclure des données sur d'autres composés de l'ion ferrique (Fe^{3+}) et de l'ion ferreux (Fe^{2+}) et sur le fer en poudre. Dans la plupart des cas, le cation a plus d'importance que les avions. Les composés ferreux ont été inclus pour établir une comparaison.

Les sels ferreux et ferriques ne sont pas très toxiques lorsqu'ils sont ingérés. Le fer présent dans les eaux potables naturelles ne semble pas nuire à la santé humaine. On sait que le fer à l'état d'oxydation II (ferreux) est absorbé par le tractus digestif plus facilement que le fer à l'état d'oxydation III (ferrique), probablement à cause de sa plus grande solubilité. Un certain nombre de facteurs semblent influer sur l'absorption du fer: l'acidité du suc gastrique, la diète (une teneur élevée en phosphates et en acide phytique réduit l'absorption de fer), la vitamine B_6, le calcium, le cuivre, etc. (Patty, 1981; Minear, 1982). Lorsqu'il y a injection des sels de fer dans le réseau sanguin, ces derniers sont immédiatement très toxiques, et plus particulièrement

les sels ferriques. Les données sur les doses intrapéritonéales et intraveineuses qui suivent peuvent être comparées aux données sur l'ingestion (Patty, 1981).

La cause directe de la mort provoquée par des composés du fer chez des animaux est un arrêt respiratoire. Les symptômes cliniques avant-coureurs de la mort sont l'anorexie, l'oligodipsie, l'oligurie, l'alcalose, la diarrhée, la perte de poids, l'hypothermie et l'alternance d'un état d'irritabilité et d'un état dépressif. L'autopsie révèle une perte de poids de la majorité des organes, accompagnée d'une déshydratation quand la mort a été rapide et d'oedème lorsque la mort a été plus lente. Le signe histopathologique prépondérant est la congestion vasculaire du tractus digestif, du foie, des reins, du coeur, des poumons, du cerveau, de la rate, des glandes surrénales et du thymus. Les signes d'un empoisonnement commencent à disparaître, chez les survivants, après une semaine et sont complètement disparus après deux à quatre semaines (Patty, 1981).

7.4.2 Ingestion

Exposition (teneur et durée)	Effets	Référence
• CHEZ L'HOMME		
60 mg/kg (en $FeSO_4$), femme adulte	DTmin. (affecte surtout le système nerveux central)	Patty, 1981
200 mg/kg (en $FeSO_4$), femme	DLmin.	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
200 mg/kg à 250 mg/kg (en Fe)	Dose létale	Kirk-Othmer, 1981
390 mg/kg (en $FeSO_4$), enfant	DLmin.	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
600 mg/kg (en $FeSO_4$), nourrisson	DTmin. (affecte le tractus digestif)	Patty, 1981
30 g	Dose fatale selon les estimations	TDB (on-line), 1981
• CHEZ LE CHIEN		
200 mg à 800 mg (en $FeCl_3$ anhydre)	Sans effet	Patty, 1981
• CHEZ LE LAPIN		
7 mg/kg	DLmin.	TDB (on-line), 1981
890 mg/kg (en $FeCl_2 \cdot 4\ H_2O$)	DLmin.	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
• CHEZ LE RAT		
319 mg/kg (en $FeSO_4$)	DL50	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
900 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50 (d'après d'anciennes références)	Patty, 1981
900 mg/kg (en $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$)	DL50	OHM-TADS, 1981
984 mg/kg (en $FeCl_2 \cdot 4\ H_2O$)	DL50	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
1480 mg/kg (en $FeSO_4$)	DL50	Patty, 1981
1989 mg/kg (en $FeSO_4 \cdot 7\ H_2O$)	DL50	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
3250 mg/kg [en $Fe(NO_3)_3 \cdot 9\ H_2O$]	DL50	Patty, 1981
0,5 g/kg à 5 g/kg	DL50	CHRIS, 1978
98,6 g/kg (en poudre de Fe)	DL50	Patty, 1981
• CHEZ LA SOURIS		
400 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50	Patty, 1981

440 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50 (d'après d'anciennes références)	Patty, 1981
540 mg/kg	DL50	TDB (on-line), 1981
979 mg/kg (en $FeSO_4$)	DL50	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
1278 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50	RTECS, 1979
1520 mg/kg (en $FeSO_4 \cdot 7\ H_2O$)	DL50	Kirk-Othmer, vol. 15, 1981
1550 mg/kg [en ferrocène, $(5\ H_5)_2$ Fe]	DL50	Patty, 1981

7.4.3 Injection intrapéritonéale

Exposition (teneur et durée)	Effets	Référence
• CHEZ LA SOURIS		
68 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50	Patty, 1981
100 mg/kg (en $FeSO_4$)	DL50	Patty, 1981
260 mg/kg (en $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$)	DL50	Patty, 1981
335 mg/kg [en ferrocène, $(Cl_2H_5)_2$ Fe]	DL50	Patty, 1981

7.4.4 Injection intraveineuse

Exposition (teneur et durée)	Effets	Référence
• CHEZ LE LAPIN		
7 mg/kg (en $FeCl_3$)	DLmin. (d'après d'anciennes références)	Patty, 1981
7 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DLmin.	RTECS, 1979
7,2 mg/kg	DL50	AAR, 1981; OHM-TADS, 1981
• CHEZ LA SOURIS		
49 mg/kg (en $FeCl_3$)	DL50	AAR, 1981; OHM-TADS, 1981
142 mg/kg (en $FeCl_3$ anhydre)	DL50	RTECS, 1979

7.4.5 Injection subcutanée

Exposition (teneur et durée)	Effets	Références
• CHEZ LA SOURIS		
1600 mg/kg (en $FeSO_4$) pendant 16 semaines	DLmin.	Patty, 1981
2600 mg/kg (en gluconate ferreux) pendant 13 semaines	DLmin.	Patty, 1981
4200 mg/kg (en lactate ferreux) pendant 21 semaines	DLmin.	Patty, 1981
104 000 mg/kg (en Fe-dextran)	DLmin.	Patty, 1981

7.4.6 Carcinogénécité, tératogénécité et mutagénécité (Patty, 1981). – Les propriétés tumorigènes du fer et de ses composés inorganiques ont fait l'objet d'une étude à l'aide d'injections subcutanées. À part un fibrôme causé par du sulfate ferreux, ni le fer, ni ses composés

inorganiques, y compris l'hématite [$FeO(OH) \cdot x\ H_2O$], n'ont causé de tumeurs. Les animaux qui ont servi aux essais incluaient des souris, des rats et des hamsters. De l'oxyde ferrique a été administré par inhalation ou par voie intratrachéale à la souris, au hamster et au cobaye sans apparition de tumeurs. Parmi les dérivés organiques, le ferrocène [$Fe(C_5H_5)_2$], la ferritine, (protéine contenant du fer), le citrate ferrique ($FeC_6H_5O_7 \cdot 3\ H_2O$), le salicylate ferrique [$Fe(C_6H_4(OH)COO)_3$] et l'ascorbate ferrique [$Fe(C_6H_7O_6)_3$] n'ont pas causé de tumeurs. Le Fe-dextran, un complexe de poids moléculaire de 180 000, a causé plusieurs types de tumeurs au point d'injection (doses massives). On a déterminé après qu'il y avait peu de risque de tumeur maligne chez l'homme. On considère la sidérose comme une pneumoconiose bénigne parce six à dix ans avant qu'il soit possible de déceler quelque changement par roentgénographie. Même s'il y a une incidence plus élevée de cancers du poumon chez les mineurs de mines de fer, l'effet carcinogénique n'a pu être relié directement à l'oxyde de fer. Il n'existe aucune donnée sur les effets possibles du chlorure ferrique.

7.5 Symptômes d'intoxication

Aucune référence n'est donnée pour les symptômes de nature courante mentionnés dans la plupart des documents consultés. Seuls les symptômes ou troubles de nature particulière ou inhabituelle sont suivis de la référence appropriée.

7.5.1 Inhalation

1. Irritation du nez et de la gorge.
2. Picotements et sensation de brûlure des voies respiratoires.
3. Toux.
4. Difficultés respiratoires (AAR, 1981).

7.5.2 Ingestion

1. Salivation.
2. Sensation de brûlure de la bouche et de la gorge.
3. Sensation de brûlure de l'estomac.
4. Crampes stomacales.
5. Nausées et vomissements (GE, 1979).
6. Diarrhée.
7. Albuminurie (ITII, 1981).
8. Hématurie (ITII, 1981).
9. Convulsion possible (Lefevre, 1980).
10. Hémorragie gastrique (ITII, 1981).
11. Albuminurie et hématurie (ITII, 1981).
12. Mort.

7.5.3 Contact avec la peau

1. Démangeaison.
2. Coloration de la peau (GE, 1979).
3. Irritation et sensation de brûlure.
4. Dermatite après une exposition prolongée (GE, 1979).
5. Ulcération et possiblement nécrose profonde.

7.5.4 Contact avec les yeux

1. Sensations de piqûre et de brûlure.
2. Larmoiement.
3. Inflammation de la conjonctive.
4. Risque de lésions sérieuses.

7.6 Toxicité des produits de décomposition ou de combustion pour l'homme

Lors d'un incendie ou en présence d'une chaleur intense, le chlorure ferrique anhydre peut se décomposer en chlorure ferreux et en chlore à l'état gazeux:

$$2\ FeCl_3 \rightarrow 2\ FeCl_2 + Cl_2 \uparrow$$

Les mêmes conditions peuvent hydrolyser les solutions de chlorure ferrique en oxyde ferrique aqueux avec un dégagement simultané de vapeurs de chlorure d'hydrogène (Cotton, 1972):

$$[Fe(H_2O)_6]^{3+} + 3\ Cl^- \rightarrow [Fe(H_2O)_5(OH)]^{2+} + 2\ Cl^- + HCl \uparrow$$

Les espèces à l'état solide hydratées peuvent également dégager des vapeurs de chlorure d'hydrogène au contact de la chaleur (Merck, 1983; Hawley, 1977).

Le chlorure ferrique obtenu par la décomposition du chlorure ferrique peut s'oxyder et s'hydrolyser s'il est chauffé en présence d'air humide, comme c'est le cas lors d'un incendie. Il se décompose alors en oxyde ferrique (Fe_2O_3) et en chlorure d'hydrogène (HCl) (Merck, 1983).

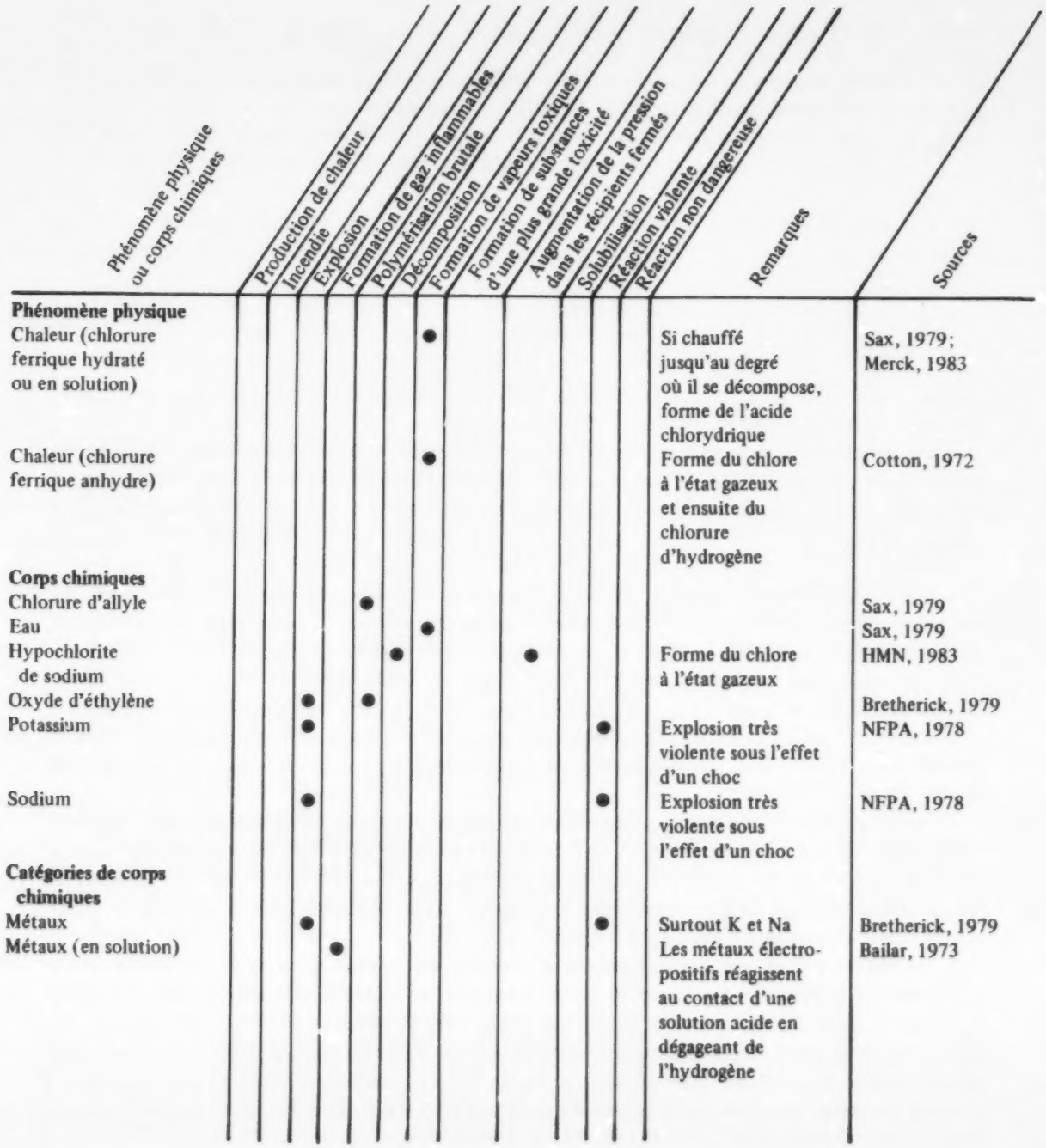
7.6.1 Chlorure d'hydrogène, chlorure ferreux et chlore. – Le chlorure d'hydrogène est un gaz incolore qui dégage une odeur âcre irritante. Le chlorure d'hydrogène à l'état gazeux peut occasionner des brûlures de la peau, des saignements du nez et des gencives et une ulcération des muqueuses nasales et buccales (Patty, 1963). Une exposition importante provoque un oedème pulmonaire et des laryngospasmes (Sax, 1968). Un travail ininterrompu en présence de teneurs élevées en chlorure d'hydrogène est improbable à cause de ses propriétés fortement irritantes. La TLV® du chlorure d'hydrogène a été fixée à 5 ppm (7 mg/m^3) pour une MPT de 8 h (TLV, 1983).

Le chlorure ferreux est, à la température ambiante, un solide blanc, possiblement teinté de vert à cause de la présence d'hydrates, qui se dissout librement dans l'eau et a une action irritante modérée. Il n'existe pas de TLV® pour le chlorure ferreux. Toutefois, la TLV® pour les sels de fer, solubles, à l'état de Fe, a été fixée à 1 mg/m^3 pour une MPT de 8 h, et pour la limite d'exposition à court terme (STEL), à 2 mg/m^3 (TLV, 1983).

Le chlore est un gaz diatomique jaune verdâtre qui dégage une odeur suffocante. Il est extrêmement irritant et peut causer un oedème pulmonaire mortel s'il est inhalé. Parmi les autres symptômes reliés à l'exposition à ce gaz, on compte les troubles respiratoires, la corrosion des dents, l'inflammation des muqueuses nasales et une plus grande susceptibilité à la tuberculose des travailleurs exposés de façon chronique. La TLV® du chlore a été fixée à 1 ppm (3 mg/m^3) pour la moyenne pondérée en fonction du temps (MPT de 8 h) et à 3 ppm (9 mg/m^3) pour la limite d'exposition à court terme (STEL) (TLV, 1983).

8 COMPATIBILITÉ CHIMIQUE

8.1 Compatibilité du chlorure ferrique et de divers corps chimiques



Phénomène physique ou corps chimiques	Production de chaleur	Incendie	Explosion	Formation de gaz inflammables	Polymérisation brutale	Décomposition	Formation de vapeurs toxiques	Formation de substances d'une plus grande toxicité	Augmentation de la pression dans les récipients fermés	Solubilisation	Réaction violente	Réaction non dangereuse	Remarques	Sources
Phénomène physique														
Chaleur (chlorure ferrique hydraté ou en solution)						●							Si chauffé jusqu'au degré où il se décompose, forme de l'acide chlorydrique	Sax, 1979; Merck, 1983
Chaleur (chlorure ferrique anhydre)						●							Forme du chlore à l'état gazeux et ensuite du chlorure d'hydrogène	Cotton, 1972
Corps chimiques														
Chlorure d'allyle				●										Sax, 1979
Eau						●								Sax, 1979
Hypochlorite de sodium					●			●					Forme du chlore à l'état gazeux	HMN, 1983
Oxyde d'éthylène		●		●										Bretherick, 1979
Potassium		●								●			Explosion très violente sous l'effet d'un choc	NFPA, 1978
Sodium		●								●			Explosion très violente sous l'effet d'un choc	NFPA, 1978
Catégories de corps chimiques														
Métaux		●								●			Surtout K et Na	Bretherick, 1979
Métaux (en solution)			●										Les métaux électro-positifs réagissent au contact d'une solution acide en dégageant de l'hydrogène	Bailar, 1973

9 MESURES D'INTERVENTION ET DE SÉCURITÉ

9.1 Mesures recommandées

Les exposés qui suivent sont extraits de diverses publications. Leur formulation originale a été respectée pour éviter toute déformation de sens, et ce faisant, il a été impossible d'empêcher que n'apparaissent d'éventuels désaccords entre les sources. Toutefois, la contradiction de certaines mesures qui s'appliquent à des cas particuliers n'est qu'apparente. La mention d'une mesure ne constitue d'aucune façon une recommandation de la part d'Environnement Canada.

9.1.1 Risques d'incendie. – Le chlorure ferrique est un matériau non combustible. Durant un incendie, toutefois, la forme anhydre peut se décomposer en chlorure ferreux et en chlore. Le chlorure ferreux chauffé en présence d'humidité peut s'oxyder et s'hydrolyser et produire de l'oxyde ferrique et du chlorure d'hydrogène. La forme solide hydratée peut également dégager des vapeurs de chlorure d'hydrogène lorsqu'elle est chauffée. Le chlorure ferrique en solution aqueuse peut s'hydrolyser à la chaleur en oxyde ferrique aqueux et dégager en même temps des vapeurs de chlorure d'hydrogène (Cotton, 1972; Merck, 1983; Hawley, 1977; GE, 1977; HMIS, 1981).

9.1.2 Moyens d'extinction. – Lorsque du chlorure ferrique, anhydre ou en solution, se trouve sur les lieux d'un incendie, il est recommandé d'utiliser (AAR, 1977; DOT, 1980; HMIS, 1981; TC, 1979):

Petit feu : Poudre chimique sèche, CO_2, jet d'eau pulvérisé, mousse extinctrice.

Incendie : Jet d'eau pulvérisé, jet d'eau vaporisé ou mousse extinctrice.

Retirer les récipients de la zone d'incendie si cela ne présente aucun danger.

9.1.3 Mesures d'intervention en cas de déversement

9.1.3.1 Information générale. – Éviter tout contact avec le produit déversé. Arrêter ou ralentir l'écoulement du produit si cela ne présente aucun danger.

9.1.3.2 Déversements sur le sol. – Si le chlorure ferrique est déversé à l'état solide, le ramasser à la pelle et le mettre dans des contenants pour l'expédier dans des installations de récupération ou d'élimination (après un traitement approprié). S'il est déversé à l'état liquide, essayer de le contenir et de l'absorber sur du sable ou d'autres matériaux absorbants. Il est recommandé d'effectuer une neutralisation de la solution acide avec précipitation de l'oxyde ferrique aqueux. On peut employer comme agent de précipitation de l'ammoniac aqueux 6 *M* (GE, 1977) et(ou) du bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$) (OHM-TADS, 1981).

9.1.3.3 Déversements dans l'eau. – Un déversement de chlorure ferrique, à l'état solide ou en solution, peut avoir des conséquences néfastes pour la vie aquatique en abaissant le pH de l'eau environnante ou en produisant un floc d'oxyde ferrique aqueux par un mécanisme naturel d'hydrolyse ou par l'addition d'un agent de neutralisation ou de précipitation au cours du nettoyage. Il est recommandé d'essayer de contenir le produit déversé. La récupération de fer soluble déversé dans l'eau se fait plus aisément si on le fait précipiter, si on traite l'eau avec une base pour neutraliser l'acide et convertit le fer en oxyde ferrique aqueux relativement insoluble. Ceci peut s'effectuer en employant différentes bases; toutefois, il est préférable d'employer

du bicarbonate de sodium à cause de son action tampon (OHM-TADS, 1981), et parce qu'il ne se produira pas une augmentation excessive du pH au-dessus de 7,0 si on en a ajouté une trop grande quantité. De plus, le bicarbonate de sodium n'est que modérément toxique pour la vie aquatique (USDOT, 1976). Néanmoins, l'addition d'un agent de neutralisation nécessite un traitement supplémentaire de l'eau.

9.1.4 Nettoyage et traitement

9.1.4.1 Information générale. – Une fois récupéré, le chlorure ferrique, à l'état solide ou à l'état liquide, doit être traité avant son élimination en le tamisant ou en le versant sur une couche de bicarbonate de sodium dans un genre de réservoir étanche, ou un grand récipient. Lorsqu'il est à l'état solide ou à l'état pâteux, le mélanger complètement et le pulvériser ou le couvrir aussi complètement que possible avec de l'ammoniac aqueux 6 *M* que l'on ajoute aussi longtemps qu'il subsiste un nuage de chlorure d'ammonium. Le mélange devrait être refroidi si possible avec de l'eau glacée ou de la glace concassée au moment de l'addition de l'ammoniac aqueux. Il est important de n'ajouter qu'une quantité minimale d'eau pour faciliter la dernière étape de l'élimination. Toute eau rejetée dans l'environnement doit avoir un pH qui se situe entre 6,0 et 9,0, qui ne nuise pas à la vie aquatique (OHM-TADS, 1981 ; USDOT, 1976).

L'eau contaminée après un traitement utilisant une base [bicarbonate de sodium, chaux (CaO) ou tout autre matériau acceptable] doit être filtrée ou conservée dans un réservoir pour qu'il s'effectue une séparation par gravité du floc oxydé. Son pH doit être ramené à un niveau acceptable avant de la rejeter dans l'environnement. Les boues ou les sédiments qui se sont déposés au fond devront être enlevés et expédiés à un site approprié d'élimination des déchets (EPA-600/2-77-227).

9.1.5 Élimination du polluant. – Le chlorure ferrique recueilli sur les lieux d'un déversement ne doit jamais être rejeté dans des eaux de surface ou dans un égout. Après son traitement sur les lieux du déversement ou dans une installation de traitement des déchets, il se forme une boue qui peut être mise en décharge. Consulter les paragraphes 9.1.3.3 et 9.1.4.1 pour d'autres méthodes d'élimination.

9.1.6 Appareils et vêtements de protection. – Avant d'entrer dans une zone où ni le produit déversé ni ses propriétés ne sont connus, il faut revêtir une combinaison entièrement étanche aux agents chimiques.

Si le produit déversé est du chlorure ferrique :

- L'équipe d'intervention doit porter des vêtements protecteurs antiacide (OHM-TADS, 1981 ; GE, 1977).
- Le port de gants de caoutchouc est recommandé (GE, 1977).
- Le cloropel, le PVC et le néoprène (bonne résistance) sont considérés comme d'excellents matériaux pour la fabrication de combinaisons de protection contre le chlorure ferrique (EE-20).
- On doit trouver sur les lieux de l'intervention des douches oculaires et des douches déluge, d'accès facile (GE, 1977).

9.1.7 Précautions spéciales. – Le chlorure ferrique est un produit extrêmement corrosif et attaquera la plupart des métaux sauf le titanium et le tantalum. La tuyauterie, les récipients, etc. pour les solutions de chlorure ferrique sont généralement en verre, en caoutchouc ou en plastique. Les planches, les murs et l'équipement qui pourraient être éclaboussés par ce produit devraient avoir une couche protectrice de peinture anticorrosive (GE, 1977).

9.2 Équipement et produits spécialisés d'intervention

La brève liste qui suit est extraite d'une étude publiée en 1982 par Dillon, et elle exclut de nombreux articles qui pourraient convenir au cours des interventions. (Le lecteur trouvera dans l'ouvrage cité des renseignements sur les caractéristiques, l'efficacité et la disponibilité des articles énumérés.)

Absorption	:	Hazorb (sorbant)
Neutralisation et précipitation	:	Bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$) Chaux (CaO, $CaCO_3$) Carbonate de sodium anhydre (Na_2CO_3) Carbonate de calcium ($CaCO_3$)

10 CAS DE DÉVERSEMENT ACCIDENTEL

Le cas à l'étude est tiré d'une expérience vécue et a été inclus parce qu'il peut aider le lecteur à comprendre les mesures d'intervention prises en cas de déversement accidentel. Seuls les cas qui présentent un intérêt pour le lecteur sont exposés ci-après; le nombre de cas décrits ne traduit ni l'importance du problème ni la fréquence des déversements réels. Toute nouvelle information pertinente sera incluse dans les rééditions du manuel au fur et à mesure des progrès réalisés dans le domaine des techniques d'intervention.

10.1 **Bris d'un réservoir** (ECSER, 1976)

Au cours d'une inspection de routine dans la cour d'une usine de produits chimiques, on s'est aperçu que le contenu d'un réservoir de chlorure ferrique (environ 318 000 l) fuyait par un orifice de 2,5 cm. Environ 14 000 l de solution se sont déversés sur le sol avant que le produit obstrue lui-même l'orifice, au bout de deux heures.

Le produit déversé s'est localisé à trois endroits dans la cour. Lorsque les équipes de secours sont arrivées, elles ont commencé à pomper le produit dans un wagon-citerne spécial en caoutchouc. On a ensuite appliqué du carbonate de sodium anhydre (Na_2CO_3) pour neutraliser le chlorure ferrique restant et le sol pollué. Le sol pollué, une fois neutralisé, a été évacué dans une décharge située à proximité.

Cet incident montre que des solutions à haute teneur en chlorure ferrique peuvent se solidifier (par une évaporation de l'eau) et arrêter ainsi une fuite.

11 IDENTIFICATION ET DOSAGE DES POLLUANTS

Les méthodes d'analyse utilisées pour l'identification et le dosage des polluants chimiques d'intérêt prioritaire sont expliquées dans les lignes qui suivent.

Les méthodes décrites et les références signalées ont été choisies en fonction d'analyses d'échantillons d'air, d'eau et de sol devant être faites dans un laboratoire de chimie doté d'un équipement standard, éloigné du lieu d'où proviennent les prélèvements. Les auteurs ont consulté les sources habituelles exposant les méthodes normalisées ou recommandées et décrit sommairement celles qui s'appliquent à chaque produit chimique. Parmi ces sources, on compte des publications du National Institute for Occupation Safety and Health des États-Unis (NIOSH), de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (EPA), de l'American Water Works Association, de l'American Society for Testing and Materials et de l'American National Standards Institute.

Lorsque les méthodes normalisées ou recommandées ont été jugées fiables et suffisamment spécifiques pour l'analyse des échantillons provenant des matières déversées et du milieu touché, et lorsqu'elles ne nécessitaient pas un équipement de laboratoire hautement spécialisé, nous n'avons pas cherché plus loin. Enfin, lorsque nous avons découvert des tests simples et fiables, couramment utilisés dans l'industrie, nous les avons signalés.

11.1 Dosage du polluant présent dans l'air (analyse quantitative)

11.1.1 Absorption atomique (NIOSH, 1979). – La méthode qui suit permet de déterminer des teneurs en fer variant de 21 $\mu g/m^3$ à 210 $\mu g/m^3$ (1,45 ppm à 14,5 ppm de chlorure ferrique) lorsqu'un échantillon d'air de 180 l est prélevé.

Le filtre utilisé pour effectuer l'échantillonnage possède une membrane filtrante en ester cellulosique de 37 mm de diamètre avec des pores de 0,8 μm de diamètre. Un échantillon de 180 l est recueilli à raison de 1,5 l/mn. L'échantillon ainsi qu'un témoin sont ensuite transférés dans des béchers de 125 ml auxquels 6,0 ml d'acide nitrique à 10 p. 100 (1, 67 *M*) sont ajoutés. Ces derniers sont ensuite recouverts d'un verre de montre et chauffés, sous la hotte, à l'aide d'une plaque chauffante (165 °C) jusqu'à ce que l'échantillon se dissolve et produise une solution jaunâtre. Cette étape nécessite environ quatre heures pour la plupart des échantillons; toutefois, l'addition subséquente d'acide nitrique peut s'avérer nécessaire pour effectuer une digestion complète lorsque de fortes teneurs en matières organiques sont présentes rendant par le fait même cette étape plus longue.

Une fois la digestion complétée, indiquée par l'obtention d'une solution exempte de particules en suspension, le verre de montre est enlevé et rincé à l'aide d'acide nitrique à 10 p. 100. L'acide utilisé lors du rinçage est ajouté dans le bécher qui contient l'échantillon. On place ensuite le bécher dans un bain-marie pour faire évaporer son contenu à une température de 100 °C. Une fois l'échantillon sec, on rince les parois du bécher, à l'aide d'acide nitrique à 10 p. 100, et on le réchauffe encore durant 5 minutes à 100 °C afin de solubiliser le résidu. L'échantillon est alors transféré quantitativement dans une fiole jaugée de 10 ml, et on l'allonge à 10 ml, avec de l'acide nitrique à 10 p. 100. La solution peut dès lors être analysée immédiatement pour une identification des éléments de faible teneur ou être diluée pour l'identification des éléments présents en teneur élevée.

Les solutions étalons devraient concorder à la matrice de l'échantillon, subir au moins deux analyses et être fraîchement préparées à chaque jour. L'analyse est effectuée à l'aide d'une

flamme oxydante avec un mélange d'air-acétylène à une longueur d'onde de 248,3 nm. Les filtres témoins doivent également être analysés suivant la même méthode. Cette méthode est simple, utilise un spectrophotomètre d'absorption atomique standard et peut être utilisée pour l'analyse d'un grand nombre de métaux. Certaines interférences importantes peuvent provenir de fortes teneurs en nickel et en silicium.

11.2 Identification du polluant présent dans l'air (analyse qualitative)

L'échantillon est d'abord recueilli comme en 11.1.1. On détermine la présence de l'ion ferrique en ajoutant à cinq gouttes de l'échantillon deux à trois gouttes d'acide chlorhydrique 6 *M* et ensuite environ 1 ml d'une solution 1 *M* de thiocyanate de potassium (KCNS). L'apparition d'une couleur rouge foncée indique la présence de l'ion ferrique (Welcher, 1955). Une couleur rose pâle indique la présence d'une petite quantité de fer introduite dans la solution sous forme d'une impureté provenant des réactifs ou de la verrerie (Welcher, 1955; Hoguess, 1954).

11.3 Dosage du polluant présent dans l'eau (analyse quantitative)

11.3.1 Absorption atomique (ASTM, 1979; Water Analysis, 1982). – La méthode décrite ci-dessous permet de doser des teneurs en chlorure ferrique comprises entre 0,15 ppm et 14,5 ppm.

Le fer dissout peut être analysé en aspirant directement l'échantillon filtré dans un spectrophotomètre d'absorption atomique. Un témoin ainsi que quatre solutions étalons dont la teneur couvre une gamme étendue de teneurs doivent également être préparés. Le spectrophotomètre est ajusté à une longueur d'onde de 248,3 nm et emploie une flamme air-acétylène. La limite de détection est de 5 μg/l.

11.4 Identification du polluant dans l'eau (analyse qualitative)

La méthode décrite ci-après permet d'identifier la présence de l'ion ferrique dans un échantillon d'eau.

On détermine la présence de l'ion ferrique en ajoutant à cinq gouttes de l'échantillon deux à trois gouttes d'acide chlorhydrique 6 *M* et ensuite 1 ml d'une solution 1 *M* de thiocyanate de potassium (KCNS). L'apparition d'une couleur rouge foncée indique la présence de l'ion ferrique. Une couleur rose pâle révèle la présence d'une petite quantité de fer introduite dans la solution sous forme d'une impureté provenant des réactifs ou de la verrerie (Hoguess, 1954).

La présence de l'ion chlorure peut être confirmée en traitant une portion représentative (5 ml) de l'échantillon d'eau avec 2 à 3 gouttes d'acide nitrique concentré et en ajoutant ensuite environ 5 gouttes d'une solution 0,1 *M* de nitrate d'argent ($AgNO_3$). La formation d'un précipité blanc indique la présence de l'ion chlorure. Ce résultat peut être confirmé en rendant la solution légèrement basique par l'addition d'une solution d'hydroxyde d'ammonium 6 *M*. Le précipité devrait se dissoudre. Si on l'acidifie de nouveau avec de l'acide nitrique, le solide blanc (AgCl) devrait se reformer (Hoguess, 1954).

11.5 Dosage du polluant présent dans le sol

11.5.1 Spectrophotométrie (Hesse, 1972). – La méthode qui suit permet de doser approximativement 0,05 mg à 0,25 mg de fer total dans une partie aliquote extraite aux fins d'une analyse.

Un échantillon de sol séché au four de 0,1 g, à granulométrie de 0,15 mm, est pesé avec grande précision, placé dans un creuset de platine et légèrement humidifié à l'aide de 1 à 2 gouttes d'eau. On ajoute ensuite 5 ml d'acide fluorhydrique à 48 p. 100 et 0,5 ml d'acide perchlorique à 60 p. 100 dans le creuset, et on le recouvre presque entièrement de son couvercle. Le creuset est placé sur un lit de sable à 200 °C jusqu'à ce que le liquide qu'il contient se soit évaporé. Toute matière organique non oxydée déposée sur les parois du creuset ou sur son couvercle peut être oxydée à l'aide de la flamme d'un brûleur Meker.

Une fois le tout refroidi, on ajoute 5 ml d'acide chlorhydrique 6 *M* dans le creuset que l'on remplit ensuite à moitié avec de l'eau. On amène alors le mélange à ébullition douce sur une plaque chauffante pendant environ cinq minutes. Si on ne réussit pas de cette façon à dissoudre complètement le solide, il faut faire évaporer la solution à nouveau et recommencer l'étape de la digestion acide. La solution est alors transférée dans une fiole jaugée de 100 ml et allongée à 100 ml à l'aide d'eau distillée.

La solution de fer légèrement acide ainsi produite est traitée avec 1 à 2 gouttes de peroxyde d'hydrogène à 3 p. 100 pour oxyder totalement le fer à un état d'oxydation III.

On place ensuite 10 ml d'une solution tampon dans une fiole jaugée de 50 ml que l'on allonge à 30 ml. La solution tampon est préparée en mélangeant deux volumes égaux d'acide acétique 1 *M* et d'acétate de sodium 1 *M* et en ajustant ensuite le pH à 4,7 à l'aide d'acide acétique ou d'hydroxyde de sodium. On ajoute ensuite 5 ml du réactif analytique Tiron® à 4 p. 100 poids/ volume (dihydroxy-1, 2 benzène disulfonate-3, 5 de sodium) et une partie aliquote appropriée de l'échantillon (contenant entre 0,05 µg et 0,25 µg de fer). On allonge le tout à 50 ml et on détermine l'absorbance cinq minutes plus tard à une longueur d'onde de 565 nm. La courbe d'étalonnage devrait couvrir des teneurs comprises entre 0 µg/ml et 10 µg/ml en fer.

11.6 Identification du polluant dans le sol (analyse qualitative)

Une petite portion de sol fraîchement prélevé est placée sur une tuile de porcelaine blanche et humidifiée à l'aide d'acide chlorhydrique 1 *M*. On ajoute ensuite une goutte d'une solution de thiocyanate de potassium à 10 p. 100 (poids/volume), et la présence de fer (III) est indiquée par l'apparition d'une coloration rouge (Hesse, 1972).

12 RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE (REPRODUITES DE L'ANGLAIS)

12.1 Références

AAR 1977: Emergency Handling of Dangerous Materials in Surface Transportation, Association of American Railroads, Bureau of Explosives, Washington, DC. (September, 1977).

AAR 1981: BDM Corporation, The AAR Hazardous Materials Data Base, Prepared for the Association of American Railroads, Parts I and II, McLean, VA. (May, 1981).

AMC: Corrosion Resistance Chart for Titanium, Zirconium, Tantalum, Astro Metallurgical Corporation, Wooster, OH. Undated.

AOS 1982: Chemical Resistance, Fiber Glass Reinforced Piping Systems, A.O. Smith-Inland Inc., Reinforced Plastic Div., Little Rock, AR. (April 15, 1982).

ASS: Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

ASTM 1979: American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 31: Water, Philadelphia, PA, D1068-77. (1979).

Bailar 1973: Bailar, J.C., Jr., et al., Comprehensive Inorganic Chemistry, Pergamon Press, New York. (1973).

Bretherick 1979: Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

Campbell 1982: Campbell, M.E., Glenn, W.M., Profit from Pollution Prevention, A Guide to Industrial Waste Reduction & Recycling, Pollution Probe Foundation, Toronto, Ontario. (1982).

Carpenter 1927: Carpenter, K.E., "The Lethal Action of Soluble Metallic Salts on Fishes", Brit. J. Exp. Biol., Vol. 4, p. 378. (1927).

CBG 1980: Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

* CCR 1978: Department of Industry, Trade and Commerce, Canadian Chemical Register, Ottawa, Canada. (1978).

CDS 1967: National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, TX. (1967).

CE 1980a: Gallagher, R., "Beat Corrosion with Rubber Hose", Chemical Engineering, pp. 105-118, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (September 8, 1980).

CE 1980b: Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, pp. 86-131, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (November 3, 1980).

---

* Disponible en français.

CE 1983: Shuker, F.S., "When to Use Refractory Metals and Alloys in the Plant", Chemical Engineering, pp. 81-84, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (May 2, 1983).

Chapman 1968: Chapman, W.H., Fisher, M.L., Pratt, M.W., Concentration Factors of Chemical Elements in Edible Aquatic Organisms, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA. (30 December 1968).

CHRIS 1978: U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, DC. (1978).

Cotton 1972: Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York, NY. (1972).

CRC 1957: Hodgman, C.D., Weast, R.C., Selby, S.M. (ed.), Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, OH. (1957).

CRC 1980: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, OH. (1980).

CRC 1982: Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 63rd Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, OH. (1982).

DCRG 1978: Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, MI. (1978).

Dillon 1982: M.M. Dillon, Survey of Countermeasures Systems for Hazardous Material Spills, Environment Canada, Ottawa, Canada. (1982).

Doc. TLV 1981: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, OH. (1981).

DOT 1976: Drake, E., et al., A Feasibility Study of Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Disperse through the Water Column, U.S. Department of Transportation, Washington, DC. (July, 1976).

DOT 1980: "Hazardous Materials", 1980 Emergency Response Guidebook, DOT P 5800.2, U.S. Department of Transportation, Materials Transportation Bureau, Washington, DC. (1980).

Doudoroff 1953: Doudoroff, P., Katz, M., "Critical Review of Literature on the Toxicity of Industrial Wastes and their Components to Fish. II. The Metals and Salts", Sewage and Industrial Wastes, Vol. 25, No. 7, p. 802. (July, 1953).

Dowden 1965: Dowden, B.F., Bennet, H.J., "Toxicity of Selected Chemicals to Certain Animals", J. Water Pollut. Contr. Fed., Vol. 37, No. 9, pp. 1308-1316. (1965).

DPLV 1972: Dow Chemical Company, Dow Plastic Lined Valves, Midland, MI. (1972).

DPPED 1967: DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

ECSER 1976: Environment Canada, Significant Event Report, "Ferric Chloride", File No. 4462-2/T. (10 October 1976).

EE-20: Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, Unedited Version. Not dated.

EPA 440/9-75-009: Environmental Protection Agency, Supplement to Development Document: Hazardous Substances Regulations, Section 311 Federal Water Pollution Control Act, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water and Standards, Washington, DC, EPA 440/9-75-009. (November, 1975).

EPA 600/2-77-227: Huibregtse, K.R., et al., Manual for the Control of Hazardous Material Spills - Volume One - Spill Assessment and Water Treatment Techniques, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, OH, EPA 600/2-77-227. (November, 1977).

EPA 600/J-79-073: Spehar, R.L., et al., Effects of Pollution on Freshwater Fish, U.S. Environmental Protection Agency, Duluth, MN. (1979).

FC: Pennwalt Corporation, Ferric Chloride, Philadelphia, PA. Not dated.

GE 1977: General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (October, 1977).

GE 1978: General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (August, 1978).

GE 1979: General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (November, 1979).

GF: GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, CA. Not dated.

Ghosh 1974: Ghosh, S., Conrad, J.R., "Anaerobic Processes", JWPCF, Annual Literature Review, Vol. 47, No. 6. (1974).

Gohar 1961: Gohar, H.A.F., El-Gindy, H., "Tolerance of Vector Snails of Bitharziasis and Fasciloisis to Some Chemicals", Proc. Egypt. Acad. Sci., Vol. 16, pp. 37-48. (1961).

GPP: Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, IN. Not dated.

* Guidelines/Canadian/Water 1978: Federal-Provincial Working Group on Drinking Water of the Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality 1978, Ministry of National Health and Welfare, Ottawa, Canada. (1978).

Hawley 1977: Hawley, G.G., The Condensed Chemical Dictionary, Ninth Edition, Van Nostrand Reinhold Co., New York, NY. (1977).

Hesse 1972: Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, NY, pp. 356-358. (1972).

HFC 1965: Dow Chemical Company, Handling Ferric Chloride, Midland, MI. (1965).

HIS 1969: Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, NY. (1969).

* Disponible en français.

HMIS 1981: Department of Defence, Hazardous Materials Information System, Washington, DC. (1981).

HMN 1983: Hazardous Materials Newsletter. (June 1, 1983).

Hogness 1954: Hogness, T.R., Johnson, W.C., Qualitative Analysis and Chemical Equilibrium, Fourth Edition, Holt, Rinehart and Winston Inc., NY. (1954).

Hughes 1973: Hughes, J.S., Acute Toxicity of Thirty Chemicals to Striped Bass (*Morone Saxatilis*), Presented at the Western Association of State Game and Fish Commissioners, Salt Lake City, UT. (July, 1973).

ITII 1981: International Technical Information Institute, Toxic and Hazardous Industrial Chemicals Safety Manual for Handling and Disposal with Toxicity and Hazard Data, Japan. (1981).

JANAF 1971: Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, DC. (June, 1971).

JSSV 1979: Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, NY. (1979).

Kirk-Othmer 1981: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edition, Vols. 13 and 15, John Wiley & Sons, New York, NY. (1981).

Lange's Handbook 1979: Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw Hill Book Company, New York, NY. (1979).

Lefèvre 1980: Lefèvre, M.J., Becker, E.O., First Aid Manual for Chemical Accidents - For Use with Nonpharmaceutical Chemicals, Dowden, Hutchinson, and Ross, Inc., Stroudsburg, PA. (1980).

Merck 1976: Windholz, M., Budavari, S., Stroumtsos, L.Y., Fertig, M.N. (ed.), The Merck Index, Ninth Edition, Merck & Co. Inc., Rahway, NJ. (1976).

Merck 1983: Windholz, M., Budavari, S., Blumetti, R.F., Otterbein, E.S. (ed.), The Merck Index, Tenth Edition, Merck & Co. Inc., Rahway, NJ. (1983).

MWPP 1978: Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

NFPA 1978: National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, MA. (1978).

NIOSH 1979: National Institute for Occupational Safety and Health, Manual of Analytical Methods, Second Edition, Vol. 5, P & CAM 173, Cincinnati, OH. (August, 1979).

OHM-TADS 1981: Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, DC. (1981).

Ontario E.P. Act 1971: Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Partington 1958: Partington, J.R., General and Inorganic Chemistry for University Students, Third Edition, MacMillan and Company, New York, NY. (1958).

Patty 1963: Patty, F.A., Fassett, D.W., Irish, D.D. (ed.), Industrial Hygiene and Toxicology, Second Revised Edition, Vol. 2, "Toxicology", Interscience Publishers, New York, NY. (1963).

Patty 1981: Clayton, G.D., Clayton, F.E., Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, 3rd Revised Edition, Vol. 2A, "Toxicology", John Wiley & Sons, New York, NY. (1981).

PB 276724: Effects of Hazardous Materials Spills on Biological Treatment Processes, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/2-77-239. (1977).

PC 1972: Personal Communication, Pennwalt of Canada Ltd., Oakville, Ontario. (20 January 1972).

PC 1981: Personal Communication, Diversey, Mississauga, Ontario. (13 November 1981).

Perry 1973: Perry, R.H., Chilton, C.H. (ed.), Chemical Engineer's Handbook, Fifth Edition, McGraw Hill Book Company, New York, NY. (1973).

QCW 1976: Quality Criteria for Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (July, 1976).

RTDCR 1974: Regulations for the Transportation of Dangerous Commodities by Rail, Canadian Transport Commission, published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1974).

RTECS 1979: Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols. 1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, OH. (September, 1980).

Rudolfs 1950: Rudolfs, W., et al., "Review of the Literature on Toxic Materials Affecting Sewage Treatment Processes, Streams and B.O.D. Determinations", Sewage and Industrial Wastes, Vol. 22, p. 1157. (September, 1950).

Sax 1968: Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Third Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, N.Y. (1968).

Sax 1979: Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY. (1979).

Scott 1979: Scott's Industrial Directory of Ontario Manufacturers, 12th Edition, Penstock Directories Limited, Oakville, Ontario. (1979).

SFC 1982: Corrosion Resistance Chart, Standard Fittings Company, Opelousas, LA. (June, 1982).

Sienko 1961: Seinko, M.J., Plane, R.A., Chemistry, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1961).

Streeter 1971: Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1971).

TC 1979: Emergency Response Guide for Dangerous Goods, Supply and Services Canada, TP-1987, Copp Clark Pitman, Toronto, Ontario. (1979).

TCM 1979: General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, IL. (May, 1979).

TDB (on-line) 1981: Toxicity Data Base, Toxicology Information On-Line. Available from National Library of Medicine, Washington, DC. (1981).

TDGC 1980: Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Canada. (June, 1980).

TLV 1983: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV®s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, OH. (1983).

TPS 1978: GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, CA. (1978).

Ullmann 1975: Ullmanns Encyklopaedie der technischen Chemie, Verlag Chemie, Weinheim. (1975).

Warnick 1969: Warnick, S.L., Bell, H.L., The Acute Toxicity of Some Heavy Metals to Different Species of Aquatic Insects, Jour. Water Pollution, CONTD. FED., Vol. 41, no. 2, Part I. (February, 1969).

Water Analysis 1982: Minear, R.A., Keith, L.H. (ed.), Water Analysis, Vol. 1, "Inorganic Species", Part 1, Academic Press, New York, NY. (1982).

Water Management Goals 1978: Ontario Ministry of the Environment, Water Management Goals, Policies, Objectives and Implementation Procedures for the Ministry of the Environment, Toronto, Ontario. (November, 1978).

Welcher 1955: Welcher, F.J., Hahn, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, NJ, p. 436. (1955).

WQC 1963: McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

WQC 1971: Water Quality Criteria Data Book - Vol. 3. Effects of Chemicals on Aquatic Life, Battelle Columbus Laboratories, for U.S. Environmental Protection Agency. (1971).

WQC 1972: National Academy of Sciences, Water Quality Criteria 1972: A Report of the Committee on Water Quality Criteria, Environmental Studies Board, National Academy of Sciences, Washington, DC. (1972).

WQCDB-2 1971: Environmental Protection Agency, Water Quality Criteria Data Book: Inorganic Chemical Pollution of Freshwater, U.S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington, DC., Vol. 2. (1971).

WQCDB-5 1973: Environmental Protection Agency, Water Quality Criteria Data Book: Effects of Chemicals on Aquatic Life, U.S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington, DC., Vol. 5. (September, 1973).

12.2 Bibliographie

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Documentation of Threshold Limit Values, Fourth Edition, Cincinnati, OH. (1981).

American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV®s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1983-84, Cincinnati, Ohio. (1983).

American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 31: Water, Philadelphia, PA, D1068-77. (1979).

Association of American Railroads, Emergency Handling of Hazardous Materials in Surface Transportation, Bureau of Explosives, Washington, DC. (September 1977).

Astro Metallurgical Corporation, Corrosion Resistance Chart for Titanium, Zirconium, Tantalum, Wooster, OH. Not dated.

Atlas Steel, Atlas Stainless Steels, Toronto, Ontario. Not dated.

Bailar, J.C., Jr. et al., Comprehensive Inorganic Chemistry, Permagon Press, New York, NY. (1973).

BDM Corporation, The AAR Hazardous Materials Data Base, Prepared for the Association of American Railroads, Parts I and II, McLean, VA. (May, 1981).

Bretherick, L., Handbook of Reactive Chemical Hazards, Second Edition, Butterworths, London, England. (1979).

Buchan, Lawton, Parent Ltd., A Survey of Self-Contained Breathing Apparatus and Totally-Encapsulated Chemical Protection Suits, EE-20 Unedited Version. Not dated.

Campbell, M.E., Glenn, W.M., Profit from Pollution Prevention, A Guide to Industrial Waste Reduction and Recycling, Pollution Probe Foundation, Toronto, Ontario. (1982).

*Canadian Transport Commission, Regulations for the Transportation of Dangerous Commodities by Rail, published by Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario. (1974).

Carpenter, K.E., "The Lethal Action of Soluble Metallic Salts on Fishes", Brit. J. Exp. Biol., Vol. 4, p. 378. (1927).

Chapman, W.H., Fisher, M.L., Pratt, M.W., Concentration Factors of Chemical Elements in Edible Aquatic Organisms, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA. (30 December 1968).

Clayton, G.D., Clayton, F.E., Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, 3rd Revised Edition, Vol. 2A, "Toxicology", John Wiley & Sons, New York, NY. (1981).

Cotton, F.A., Wilkinson, G., Advanced Inorganic Chemistry, Interscience Publishers, New York, NY. (1972).

* Disponible en français.

Dean, J.A. (ed.), Lange's Handbook of Chemistry, 12th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1979).

Department of Defence, Hazardous Materials Information System, Washington, DC. (1981).

*Department of Industry, Trade and Commerce, Canadian Chemical Register, Ottawa, Canada. (1978).

M.M. Dillon, Survey of Countermeasures Systems for Hazardous Material Spills, Environment Canada, Ottawa, Canada. (1982).

DOM-X, DOM-X Plastic Pipe Engineering Data, Toronto, Ontario. (1967).

Doudoroff, P., Katz, M., "Critical Review of Literature on the Toxicity of Industrial Wastes and their Components to Fish. II. The Metals as Salts", Sewage and Industrial Wastes, Vol. 25, No. 7, p. 802. (July, 1953).

Dow Chemical Company, Dow Chemical Resistance Guide for Dow Plastic Lined Piping Products, Midland, MI. (1978).

Dow Chemical Company, Dow Plastic Lined Valves, Midland, MI. (1972).

Dow Chemical Company, Handling Ferric Chloride, Midland, MI. (1965).

Dowden, B.F., Bennet, H.J., "Toxicity of Selected Chemicals to Certain Animals", J. Water Pollut. Contr. Fed., Vol. 37, No. 9, pp. 1308-1316. (1965).

Drake, E., et al., A Feasibility Study or Response Techniques for Discharges of Hazardous Chemicals that Disperse through the Water Column, U.S. Department of Transportation, Washington, DC. (July, 1976).

Emergency Response Guide for Dangerous Goods, Supply and Services Canada, TP-1987, Copp Clark Pitman, Toronto, Ontario. (1979).

Environment Canada, Significant Event Report, "Ferric Chloride", File No. 4462-2/T. (10 October 1976).

Environmental Protection Agency, Effects of Hazardous Materials Spills on Biological Treatment Processes, U.S. Environmental Protection Agency, PB 276724, EPA 600/2-77-239. (1977).

Environmental Protection Agency, Supplement to Development Document: Hazardous Substances Regulations, Section 311 Federal Water Pollution Control Act, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water and Standards, Washington, DC. EPA 440/9-75-009. (November, 1975).

Environmental Protection Agency, Water Quality Criteria Data Book: Inorganic Chemical Pollution of Freshwater, U.S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington, DC., Vol. 2. (1971).

* Disponible en français.

Environmental Protection Agency, Water Quality Criteria Data Book: Effects of Chemicals on Aquatic Life, U.S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington, DC., Vol. 5. (September, 1973).

* Federal-Provincial Working Group on Drinking Water of the Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality 1978, Ministry of National Health and Welfare, Ottawa, Canada. (1978).

Gallagher, R., "Beat Corrosion with Rubber Hose", Chemical Engineering, pp. 105-118, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (September 8, 1980).

General American Transportation Corporation, Tank Car Manual, Chicago, IL. (May, 1979).

General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (October, 1977).

General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (August, 1978).

General Electric Company, Material Safety Data Sheets, Material Safety Information Services, Schenectady, NY. (November, 1979).

GF Plastic Systems Inc., GF Plastic Systems, Santa Ana, California. Not dated.

Ghosh, S., Conrad, J.R., "Anaerobic Processes", JWPCF, Annual Literature Review, Vol. 7, No. 6. (1974).

Gohar, H.A.F., El-Gindy, H., "Tolerance of Vector Snails of Bitharziasis and Fasciloisis to Some Chemicals", Proc. Egypt. Acad. Sci., Vol. 16, pp. 37-48. (1961).

GSR Fluid Handling, Thermoplastic Piping Systems, Sun Valley, CA. (1978).

Hawley, G.G., The Condensed Chemical Dictionary, Ninth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY. (1977).

Hazardous Materials Newsletter. (June 1, 1983).

Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, NY, pp. 356-358. (1972).

Hodgman, C.D., Weast, R.C., Selby, S.M. (ed.), Handbook of Chemistry and Physics, 39th Edition, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, OH. (1957).

Hogness, T.R., Johnson, W.C., Qualitative Analysis and Chemical Equilibrium, Fourth Edition, Holt, Rinebart and Winston, Inc., New York, NY. (1954).

Hughes, J.S., Acute Toxicity of Thirty Chemicals to Striped Bass (*Morone Saxatilis*), Presented at the Western Association of State Game and Fish Commissioners, Salt Lake City, UT. (July, 1973).

---

* Disponible en français.

Huibregtse, K.R., et al., Manual for the Control of Hazardous Material Spills - Volume One - Spill Assessment and Water Treatment Techniques, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, OH, EPA 600/2-77-227. (November, 1977).

Hydraulic Institute, Hydraulic Institute Standards, 12th Edition, New York, NY. (1969).

International Technical Information Institute, Toxic and Hazardous Industrial Chemicals Safety Manual for Handling and Disposal with Toxicity and Hazard Data, Japan. (1981).

Jenkins Brothers, Jenkins Corrosion Resistant Stainless Steel Valves, New York, NY. (1979).

Kirby, G.N., "How to Select Materials", Chemical Engineering, pp. 86-131, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (November 3, 1980).

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edition, Vols. 13 and 15, John Wiley & Sons, New York, NY. (1981).

Lefèvre, M.J., Becker, E.O., First Aid Manual for Chemical Accidents - For Use with Nonpharmaceutical Chemicals, Dowden, Hutchinson, and Ross, Inc., Stroudsburg, PA. (1980).

Lewis, R.J., Tatken, R.L., Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols. 1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, OH. (September, 1980).

McKee, J.E., Wolf, H.W., Water Quality Criteria, Second Edition, Resources Agency of California, State Water Quality Control Board. (1963).

Minear, R.A., Keith, L.H. (ed.), Water Analysis, Vol. 1, "Inorganic Species", Part 1, Academic Press, New York, NY. (1982).

National Academy of Sciences, Water Quality Criteria 1972: A Report of the Committee on Water Quality Criteria, Environmental Studies Board, National Academy of Sciences, Washington, DC. (1972).

National Association of Corrosion Engineers, Corrosion Data Survey, Houston, TX. (1967).

National Fire Protection Association, Fire Protection Guide on Hazardous Materials, Seventh Edition, Boston, MA. (1978).

National Institute for Occupational Safety and Health, Manual of Analytical Methods, Second Edition, Vol. 5, P & CAM 173, Cincinnati, OH. (August, 1979).

Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, U.S. Environmental Protection Agency, Oil and Special Materials Control Division, Office of Water Program Operations, Washington, DC. (1981).

Ontario Ministry of the Environment, "The Environmental Protection Act, Statutes of Ontario 1971", Chapter 86, as amended; and Regulation 15 (General) as amended. (1971).

Ontario Ministry of the Environment, Water Management Goals, Policies, Objectives and Implementation Procedures for the Ministry of the Environment, Toronto, Ontario. (November, 1978).

Partington, J.R., General and Inorganic Chemistry for University Students, Third Edition, MacMillan and Company, New York, NY. (1958).

Patty, F.A., Fassett, D.W., Irish, D.D. (ed.), Industrial Hygiene and Toxicology, Second Revised Edition, Vol. 2, "Toxicology", Interscience Publishers, New York, NY. (1963).

Pennwalt Corporation, Ferric Chloride, Philadelphia, PA. Not dated.

Perry, R.H., Chilton, C.H. (ed.), Chemical Engineer's Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1973).

Personal Communication, Pennwalt of Canada Ltd., Oakville, Ontario. (20 January 1972).

Personal Communication, Diversey, Mississauga, Ontario. (13 November 1981).

Quality Criteria for Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (July, 1976).

Rehau, Mechan-O-Joint Water Pressure Pipe and Fittings, Montreal, Quebec. (1978).

Rudolfs, W., et al., "Review of the Literature on Toxic Materials Affecting Sewage Treatment Processes, Streams and B.O.D. Determinations", Sewage and Industrial Wastes, Vol. 22, p. 1157 (September, 1950).

Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Third Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, N.Y. (1968).

Sax, N.I., Dangerous Properties of Industrial Materials, Fifth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY. (1979).

Scott's Industrial Directory of Ontario Manufacturers, 12th Edition, Penstock Directories Limited, Oakville, Ontario. (1979).

Shuker, F.S., "When to Use Refractory Metals and Alloys in the Plant", Chemical Engineering, pp. 81-84, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (May 2, 1983).

Sienko, M.J., Pleine, R.A., Chemistry, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1961).

A.O. Smith-Inland Inc., Chemical Resistance, Fiber Glass Reinforced Piping Systems, Reinforced Plastic Div., Little Rock, AR. (April 15, 1982).

Southam Business Publications Ltd., "1981 Chemical Buyers' Guide", Canadian Chemical Processing, Vol. 64, No. 9, Don Mills, Ontario. (December, 1980).

Spehar, R.L., et al., Effects of Pollution on Freshwater Fish, U.S. Environmental Protection Agency, Duluth, MN. (1979).

Standard Fittings Company, Corrosion Resistance Chart, Opelousas, LA. (June, 1982).

Streeter, V.L., Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY. (1971).

Stull, D.R., Prophet, H., JANAF Thermochemical Tables, Second Edition, Office of Standard Reference Data, U.S. National Bureau of Standards, Washington, DC. (June, 1971).

Toxicity Data Base, Toxicology Information On-Line. Available from National Library of Medicine, Washington, DC. (1981).

Transport Canada, Transportation of Dangerous Goods Code, Vol. 1 (Lists), Vol. 2, Ottawa, Canada. (June, 1980).

Ullmanns Encyklopaedie der technischen Chemie, Verlag Chemie, Weinheim. (1975).

Uniroyal, Guide to Polymer Properties, Uniroyal Inc., Mishawaka, IN. Not dated.

U.S. Department of Transportation, "Hazardous Materials", 1980 Emergency Response Guidebook, DOT P 5800.2, Materials Transportation Bureau, Washington, DC. (1980).

U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, DC. (1978).

Water Quality Criteria Data Book - Vol. 3. Effects of Chemicals on Aquatic Life, Battelle Columbus Laboratories, for U.S. Environmental Protection Agency. (1971).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60th Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, OH. (1980).

Weast, R.C. (ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 63rd Edition, Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, OH. (1982).

Welcher, F.J., Hahn, R.B., Semimicro Qualitative Analysis, D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, NJ, p. 436. (1955).

Windholz, M., Budavari, S., Blumetti, R.F., Otterbein, E.S. (ed.), The Merck Index, Tenth Edition, Merck & Co. Inc., Rahway, NJ. (1983).

Windholz, M., Budavari, S., Stroumtsos, L.Y., Fertig, M.N. (ed.), The Merck Index, Ninth Edition, Merck & Co. Inc., Rahway, NJ. (1976).